



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SÃO PAULO
CAMPUS SÃO PAULO

WILLIAM CÉSAR SANTOS RAMALHO

TRANSDUTOR DE SAFIRA PARA MEDIÇÃO DA
VELOCIDADE DA INTERAÇÃO GRAVITACIONAL

São Paulo
2016

WILLIAM CÉSAR SANTOS RAMALHO

TRANSDUTOR DE SAFIRA PARA MEDIÇÃO DA
VELOCIDADE DA INTERAÇÃO GRAVITACIONAL

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de São Paulo como parte dos
requisitos para obtenção do Título de
Mestre em Automação e Controle de
Processos.

Área de Concentração:
Controle e Automação

Orientador:
Prof. Dr. Carlos Frajuca

São Paulo
2016

R136t

RAMALHO, William César Santos.

Transdutor de safira para medição da velocidade da interação gravitacional [manuscrito] / William César Santos Ramalho. São Paulo: [s.n.], 2016.

125 f. : il. Color ; 30cm.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Frajuca.

Dissertação (Mestrado Profissional em Automação e Controle de Processos) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, IFSP, 2016.

1. Detecção de sinais gravitacionais 2. Transdução paramétrica
3. Safira I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
de São Paulo. II. Título.

CDD 539.754



ATA DE EXAME DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Nome do Programa: **Mestrado Profissional em Automação e Controle de Processos**

Nome do(a) Aluno(a) : William César Santos Ramalho

Nome do Orientador: Prof. Dr. Carlos Frajuca

Nome do Coorientador:

Título do Trabalho: "Transdutor de safira para medição da velocidade da interação gravitacional"

Abaixo o resultado de cada participante da Banca Examinadora

Nome completo dos Participantes Titulares da Banca	Sigla da Instituição	Aprovado / Não Aprovado
Prof. Dr. Carlos Frajuca – Orientador	IFSP – SPO	Aprovado
Prof. Dr. Fabio da Silva Bortoli – Membro Interno	IFSP – SPO	Aprovado
Prof. Dr. Eduardo Acedo Barbosa – Membro Externo	FATEC - SP	Aprovado
Nome completo dos Participantes Suplentes da Banca	Sigla da Instituição	Aprovado / Não Aprovado
Prof. Dr. Ricardo Pires – Membro Interno	IFSP - SPO	
Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi - Membro Externo	FATEC - SP	

Considerando-o: ☒ APROVADO
[] NÃO APROVADO

Assinaturas

São Paulo, 29 de abril de 2016


Presidente da Banca


Membro Interno


Membro Externo

Observações:

O discente tem 30 dias
p/ entregar a versão
final com as sugestões
sugeridas.

Dedico este trabalho a toda minha amada
família em especial a dona Leontina, ao senhor
Antônio, minha irmã Maiza, meu cunhado
Marcão, ao meu sobrinho Nathan e à minha
futura esposa Aline.

Amo todos vocês!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus!

Ao meu grande orientador Prof. Dr. Carlos Frajuca por ter sido acolhedor, estimulante e acreditar em meu trabalho, além de ser um grande profissional e pessoa, sanando dúvidas e sempre disposto a me atender, o aprecio e tenho uma grande admiração por ele.

Os professores do Instituto Federal de São Paulo que compartilharam os seus conhecimentos conosco durante as aulas. Aos professores Mori, Caporalli, Eduardo Costa, Ricardo Pires e ao professor Alexandre Brincalepe que me motivou na graduação a fazer o mestrado no Instituto em uma de suas aulas na USJT.

O meu grande amigo Nicolino! Que sem a sua colaboração, inteligência, ter cedido parte de seu tempo e sua experiência para me ajudar eu não teria alcançado qualquer objetivo.

Grande Professor Álvaro Mamoru por ter me apoiado semanalmente durante a escrita do meu trabalho.

Ao Instituto Federal de São Paulo e seus colaboradores que foram muito prestativos no atendimento da biblioteca e da coordenadoria de pós-graduação, em especial a Karina Mitie Fujihara e o Caio Cabral.

Os meus amigos e companheiros do curso que me motivaram, estiveram ao meu lado, estudamos juntos, comemos pizzas juntos, dedicaram parte de seu tempo para me ajudar.

Minha “irmã” Maiza, que sempre foi uma das minhas grandes inspirações, sempre me ajudou, motivou e esteve ao meu lado.

Minha mãe e meu pai zelosos, maravilhosos, trabalhadores, amados, meus grandes exemplos!

Como eu amo minha família!

E em especial minha futura esposa Aline! Tenha paciência! Ainda têm mais por vir!

A todos os meus amigos e companheiros de trabalho do SENAI, principalmente ao senhor Rafael Pereira Bachega, pelo incentivo e apoio na realização desse curso.

Muito Obrigado!

RESUMO

Só recentemente foi possível comprovar, através de medições diretas, a existência das Ondas Gravitacionais previstas na Teoria da Relatividade Geral de Albert Einstein, isso se deve ao fato dos sinais gravitacionais interagirem fracamente com a matéria, até que então o projeto LIGO com seus dois interferômetros de alta sensibilidade detectaram a onda gravitacional proveniente de uma fusão de buracos negros a 1,3 bilhões de anos luz.

Diferente dos sinais gravitacionais, os sinais eletromagnéticos são muito bem conhecidos pela ciência, principalmente devido ao fato de se poder gera-los e detectá-los. Um dos objetivos a serem alcançados ao se detectar sinais gravitacionais, é a medida precisa da sua velocidade de propagação, para isso estão sendo desenvolvidos um “Gerador de Sinais Gravitacionais de Maré” e um “Detector de Sinais Gravitacionais de Maré” para serem utilizados em conjunto em um “Ensaio para se determinar a velocidade de propagação de Sinais Gravitacionais”. O desenvolvimento do sistema de detecção e transdução é o foco desse projeto de pesquisa onde uma peça de safira será utilizada para realizar a detecção e a transdução paramétrica do sinal gravitacional.

Palavras chaves: Detecção de sinais gravitacionais; Transdução paramétrica; Safira;

ABSTRACT

Only recently it was possible to prove through direct measurements, the existence of gravitational waves provided for in Albert Einstein's Theory of General Relativity, this is because of gravitational signals weakly interact with matter, until then the LIGO project with his two interferometers high sensitivity detected the gravitational signal from a fusion of black holes to 1,3 billion light years.

Unlike gravitational signals, the electromagnetic signals are well known to science, mainly due to the fact that they can be generated and detected. One of the objectives to be achieved by detecting gravitational signals is the precise measurement of its speed of propagation and for this are being developed a 'Gravitational Signal Generator Tide' and a 'Gravitational Signal Detector Tide' for use together in an 'Assay to determine the propagation velocity of gravitational signals'. The development of detecting and transducing system is the focus of this research project in which a sapphire piece is used to carry out the detection and parametric signal transduction gravity.

Key Words: Gravitational Signal Detection; Parametric Transduction; Sapphire; .

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: A distorção de um anel de partículas teste durante um ciclo de uma onda propagando-se na direção z. O efeito de ambas as polarizações lineares é mostrado. Fonte: (ANDRADE, 2004).	28
Figura 2: Destaque do modelo simplificado do detector e do emissor de sinais gravitacionais de maré periódicos. Fonte: <i>Frajuca e Ruiz (2014)</i> ;	29
Figura 3: Modelo completo de um detector de ondas gravitacionais do tipo barra ressonante de dois modos, acoplado a um transdutor paramétrico do tipo cavidade reentrante. Fonte: Adaptação de Andrade (2004) da figura de Tobar (1998)	32
Figura 4: modelo de sistema de três modos. Fonte: J. P. Richard (1984).	33
Figura 5: Distorções radiais e longitudinais causadas pelo SGMP que atravessa o transdutor e produzem forças de tração e compressão que excitam um dos modos mecânicos, essas oscilações alteram a frequência da ressonância eletromagnética (Mostrada como a região escura da figura).	39
Figura 6: Modelo equivalente de circuito com capacitância modulada, a capacitância do circuito muda devido aos deslocamentos relativos de massa do detector. Fonte: Locke et al. (1998)	39
Figura 7 – Perfil da peça de safira e de sua suspensão, no detalhamento da figura a circunferência representa o cilindro de safira.	44
Figura 8 – Perfil do fio da suspensão, o fio encosta tangencialmente no cilindro de safira.	44
Figura 9 – Sólido construído a partir dos perfis desenhados nos <i>Sketches</i>	45
Figura 10 – Região detalhamento do contato tangencial entre cilindro e suspensão	46
Figura 11 – Vista ampla do referencial entre o contorno do cilindro e a suspensão, a medida é realizada a partir do centro do diâmetro do fio, até o eixo do cilindro.	46
Figura 12 – Vista em aproximação do detalhe do raio de contato	47
Figura 13 – Raio de contato entre suspensão e o cilindro	47

Figura 14 – Vista frontal do raio de contato entre a suspensão e o cilindro, o contato entre o fio e o cilindro é limitado pela abertura do ponto de fixação do fio, quanto mais aberto menor será a área de contato, isso é dado pela cota H23 na Figura 7.....	48
Figura 15 – Vista lateral esquerda do dispositivo.....	49
Figura 16 – Destaque das fórmulas que relacionam as cotas em seus respectivos planos de trabalho em cada <i>Sketch</i>	50
Figura 17 – Essa figura apresenta os valores médios para ensaios de tribologia realizados entre a safira e o nióbio com o objetivo de se determinar o coeficiente de fricção. É apresentada a evolução do coeficiente de fricção em relação ao número de ciclos de realização do ensaio. As peças são friccionadas umas às outras com movimentos aleatórios sem que haja deformação na superfície do material. Fonte: (DOWSON, DALMAZ, <i>et al.</i> , 1992)	52
Figura 18 – Comportamento do coeficiente de expansão térmica (Thermal Expansion Coefficient) em função da temperatura na Safira (<i>Al2O3</i>). Fonte: (DOBROVINSKAYA, LYTVYNOV e PISHCHIK, 2009).	53
Figura 19 – Coeficiente de condutividade térmica e sua dependência da temperatura, gráfico para baixas temperaturas e altas temperaturas. Fonte: (DOBROVINSKAYA, LYTVYNOV e PISHCHIK, 2009).	53
Figura 20 - Atribuição da safira ao cilindro do detector, essa informação fica disponível no “ <i>Material Library</i> ”.	54
Figura 21 - Atribuição do nióbio à suspensão do detector.	55
Figura 22 – <i>Imprint Face</i> na região de contato da suspensão.	56
Figura 23 - Contorno de contato obtido através de “ <i>Imprint Faces</i> ”.	56
Figura 24 - Após a realização dos ajustes do refinamento, o contato (região em amarelo) se estendeu por todo o arco de contato, as regiões vermelhas são interpretadas como pequenas interferências.	57
Figura 25 - Configurações da malha da região de contato.	57
Figura 26 – Seleção do contorno de refinamento nas configurações do parâmetro <i>Edge Sizing</i> da malha na região de contato.	58
Figura 27 - Configurações de refinamento da malha nas faces axiais do cilindro.	59

Figura 28 - Áreas das faces axiais selecionadas para o refinamento da malha.	59
Figura 29 – Malha finalizada após o refinamento da face e da zona de contato.	60
Figura 30 - Configuração de Contato.	61
Figura 31 - Pequenas fissuras de contato entre as peças.	62
Figura 32 - Penetração dos elementos de contato entre as peças.	63
Figura 33 - Detalhamento dos pontos de fixação da suspensão.	64
Figura 34 - Em amarelo no centro o vetor aceleração gravitacional (g).	64
Figura 35 - Gráfico que apresenta as etapas de aplicação da aceleração gravitacional.....	65
Figura 36 - Gráfico que apresenta a etapa de aplicação do degrau térmico de 4 K.	66
Figura 37 - Resultado após a simulação da deformação total.	67
Figura 38 - Gradiente de cores que indicam o local de maior deformação no fio da suspensão.	68
Figura 39 - Gráfico da evolução das deformações máximas na suspensão.....	69
Figura 40 - Deformação em uma escala 5:1.	70
Figura 41 - Evolução da deformação da suspensão no tempo em escala ampliada. Na sequência da esquerda para a direita, de cima para baixo os instantes 8 s, 16 s, 28 s e 40 s. ...	71
Figura 42 - Evolução da absorção de energia pela suspensão. Na sequência da esquerda para a direita, de cima para baixo os instantes 8 s, 16 s, 28 s e 40 s.....	72
Figura 43 - Evolução da absorção de energia nos pontos de absorção máxima e mínima.....	73
Figura 44 - Em destaque os pontos de maior (<i>Max</i>) e menor (<i>Min</i>) absorção de energia.....	74
Figura 45 - Distribuição da <i>Stress</i> no fio da suspensão.	74
Figura 46 - Evolução do <i>Stress</i> no fio da suspensão.	75
Figura 47 - Deformação do detector ocasionada pelo próprio peso em escala ampliada.....	76
Figura 48 – Visão em vários ângulos do <i>Stress</i> no detector. A região vista em (A), (B) e (D) se referem ao contato entre o fio e o cilindro, já a região (C) se dá graças a inflexão da peça com o peso próprio.	77
Figura 49 - Coeficiente de segurança de todos os elementos da estrutura.	78

Figura 50 - Esquema adotado pelo ANSYS®. A informação de Solução de uma análise ajusta os parâmetros da próxima análise.....	79
Figura 51 - Evolução no tempo do ciclo de compressão do modo de vibrar 24 da SM.....	81
Figura 52 – Evolução no tempo do Semiciclo de expansão do cilindro no modo de vibrar 24.	82
Figura 53 - Um modo acima do modo de interesse. Percebe-se a vibração apenas da suspensão.....	83
Figura 54 - Um modo abaixo do modo de interesse. Mais uma vez a vibração ocorre apenas na suspensão.	83
Figura 55 - Segundo modo acima do modo de interesse, modo 26.....	84
Figura 56 - Segundo modo abaixo do modo de interesse, modo 22.....	84
Figura 57 - Posicionamento das cargas mecânicas para simulação de resposta harmônica.	85
Figura 58 - Resposta em frequência da deformação do cilindro no eixo z na banda de 23199 Hz a 32810 Hz.....	87
Figura 59 - Resposta em frequência da deformação do cilindro no eixo x na banda de 23199 Hz a 32810 Hz.....	88
Figura 60 - Resposta em frequência da deformação do cilindro no eixo y na banda de 23199 Hz a 32810 Hz.....	89
Figura 61 - Resposta em frequência da amplitude em torno da frequência do modo ressonante de interesse.	90
Figura 62 - Resposta em frequência do ângulo de fase do sinal em torno do modo ressonante de interesse.	91
Figura 63 - Aproximação para o cálculo de QM.	92
Figura 64 – (A) Resposta em frequência na banda de 25301 Hz a 25302 Hz (B) Deformação na frequência central da banda.	93
Figura 65 - Planta utilizada na excitação.....	95
Figura 66 - Detector posicionado acima do plano de terra e entre as portas de excitação.	95
Figura 67 - Principais parâmetros de cotas em vista superior.	96

Figura 68 - Principais parâmetros de cotas em vista frontal.....	96
Figura 69 - Cotas paramétricas utilizadas para modelagem do cabo coaxial utilizado na excitação.	97
Figura 70 - Destaque da vista inferior do plano de terra e o posicionamento das portas.	97
Figura 71 - Ajustes manuais de geração de malha: longe do modelo (<i>Far from Model</i>) é gerado de uma a duas células por comprimento de onda enquanto perto do modelo são utilizadas sempre duas células (elementos).	101
Figura 72 - Dados Estatísticos da criação da malha onde: <i>Small cell</i> (Tamanho da menor célula), <i>Largest cell</i> (Tamanho da maior célula), <i>Number of cells</i> (Número de células), N_x , N_y , N_z (Número de linhas respectivamente no eixo x, y e z).	102
Figura 73 – Finalização manual da malha.	102
Figura 74 - Condições de contorno ajustadas.	103
Figura 75 – Perspectiva isométrica das condições de contorno posicionadas no <i>Bounding Box</i>	104
Figura 76 - Visão em perspectiva da parte inferior da <i>Bounding Box</i> exibindo a condição de contorno no plano de terra.	104
Figura 77 - Ajuste automático das amostras de frequência. Observar o campo <i>Samples em branco</i>	105
Figura 78 - Ajuste padrão para o método de convergência dos <i>S-Parameter</i>	105
Figura 79 - <i>S-Parameter</i> , S_{11}	106
Figura 80 - <i>S-Parameter</i> , S_{21}	106
Figura 81 - <i>S-Parameter</i> , S_{12}	107
Figura 82 - <i>S-Parameter</i> , S_{22}	107
Figura 83 - Reposta em frequência do parâmetro de reflexão da Porta 1 numa faixa entre 10,006 GHz e 10,012 GHz, frequência central desse modo é de 10.009108 GHz.....	108
Figura 84 – Amplitude do campo magnético no eixo z Porta 1 a Porta 2, na frequência de 10.00911 GHz.....	108
Figura 85 - Resposta em frequência em torno da 10,0423 GHz.	109

Figura 86 – Amplitude do campo magnético no eixo z Porta 1 a Porta 2, na frequência de 10,0423 GHz em dois instantes diferentes.....	110
Figura 87 - Configuração do <i>Parameter Sweep</i> para uma lista de dois valores para ztransform.	111
Figura 88 - Mudança de posição da frequência central devido à variação no comprimento do detector.	112
Figura 89 - Densidade espectral de potência das bandas laterais do ruído numa.....	117

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Propriedades Físicas dos Materiais candidatos	36
Quadro 2 – Distâncias adotadas para o dimensionamento da peça.	49
Quadro 3 – Propriedades da Safira para a simulação mecânica (DOBROVINSKAYA, et al. , 2009).....	51
Quadro 4 - Resumo da finalização da malha	60
Quadro 5 - Evolução da Deformação Máxima da suspensão no tempo.....	69
Quadro 6 - Evolução da Absorção de Energia nos pontos de Máxima e Mínima absorção. ...	73
Quadro 7 - Evolução do <i>Stress</i> no fio da suspensão. <i>Stress</i> Medido no ponto de menor e de maior valor.....	75
Quadro 8 – Cem primeiros modos naturais encontrados.....	79
Quadro 9 – Ajustes dos valores das cotas paramétricas utilizadas no modelo e suas descrições.	98
Quadro 10 – Variação dos parâmetros de simulação e da frequência central.	112

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	<i>Computer Aided Design</i> – Desenho Assistido por Computador
DOGBR	Detector de Onda Gravitacional tipo Barra Ressonante
DOGI	Detectores de Ondas Gravitacionais Interferométricos
DOGMR	Detectores de Ondas Gravitacionais de Massa Ressonante
DSGMP	Detector de Sinal Gravitacional de Maré Periódico
FDTD	<i>Finite Difference Time-Domain</i> - Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo
FIT	<i>Finite Integration Technique</i> - Técnica da Integração Finita
GSGMP	Gerador de Sinais Gravitacionais de Maré Periódicos
LCR	Indutor, Capacitor e Resistor
LIGO	<i>Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory</i> – Observatório Interferométrico de Ondas Gravitacionais
MEF	Método dos Elementos Finitos
MWS	<i>CST Microwave Studio</i> ®
OG	Ondas Gravitacionais
PEC	<i>Perfect Conductor</i> - Condutor Perfeito
QE	Fator de Qualidade Elétrica
QM	Fator de Qualidade Mecânica
<i>S-Parameter</i>	<i>Scatering Parameter</i> – Parâmetro de Espalhamento de Quadripólo
SEE	Simulação Estática Estrutural
SGMP	Sinal Gravitacional de Maré Periódico
SH	Simulação Harmônica
SM	Simulação Modal

LISTA DE SÍMBOLOS

Al	Alumínio
Al_2O_3	Safira
cm	centímetro
Cu	Cobre
GHz	Giga Hertz
He	Hélio
Hz	Hertz
K	Kelvin
mK	mili Kelvin
mm	milímetros
N	Newton
Nb	Nióbio
nHz	nano Hertz
rps	rotações por segundo
rpm	rotações por minuto
T	Toneladas
V	Volts

SUMÁRIO

1	Introdução	20
1.1	Objetivo	24
1.1.1	Objetivos Específicos	24
1.2	Metodologia	25
1.2.1	Análise Numérica utilizando recursos computacionais	25
1.2.2	Pesquisa relacionada à aplicação de materiais	25
1.2.3	Análise do comportamento dinâmico do protótipo proposto	25
1.3	Estrutura do trabalho.....	26
2	A Ciência da Onda Gravitacional	27
2.1	Tipos de aproximação da solução radiativa das equações de campo da TRG no vácuo.....	27
2.1.1	Tipos de polarização das OG's.....	28
2.2	A Geração e a Detecção do Sinal Gravitacional.....	28
2.2.1	O gerador de sinais gravitacionais de maré.....	30
2.2.2	Detectores de sinais gravitacionais de maré tipo barra ressonante	31
2.3	Mecanismo de transdução.....	37
2.4	Escolha do sistema de refrigeração.....	40
2.5	Escolha do sistema de suspensão.....	40
2.6	Escolha do gerador de micro-ondas.....	41
2.7	Geometria do transdutor	42
3	Simulação Mecânica	43
3.1	Desenho Geométrico dos Sólidos – cilindro sem furo	43
3.2	Ajuste dos parâmetros dos materiais na simulação mecânica	50
3.3	Simulação estática estrutural	54
3.3.1	Materiais utilizados	54
3.3.2	Discretização (Malha)	55
3.3.3	Parametrização do contato	60
3.3.4	Suportes de fixação (<i>Fixed Suports</i>)	63
3.3.5	Cargas mecânicas (<i>Loads</i>).....	64
3.3.6	Configuração dos degraus (<i>steps</i>)	65
3.3.7	Resultados da Simulação Estática Estrutural	66
3.4	Simulação modal	78
3.4.1	Investigando os modos naturais	79
3.4.2	O modo de interesse	80
3.4.3	Os modos adjacentes	82
3.5	Simulação harmônica.....	84
3.5.1	Aplicação das cargas de simulação harmônica	85
3.5.2	Investigando a resposta em frequência da estrutura.....	86
3.5.3	Cálculo do Q mecânico	89
3.5.4	Excitação harmônica senoidal em frequência fora da ressonância	92
4	Simulação Elétrica (SE).....	94
4.1	Desenho Geométrico dos Sólidos – cilindro sem furo	94
4.2	Materiais utilizados.....	98
4.2.1	<i>Perfect Conductor</i> (PEC)	98

4.2.2	Vácuo (Vacuum)	99
4.2.3	Polietileno Sólido	99
4.2.4	Safira (Al_2O_3 , pure Sapphire)	99
4.3	Solução no Domínio da Frequência (<i>Frequency Domain Solver</i>)	99
4.3.1	<i>S-Parameter</i>	99
4.3.2	Ajuste dos parâmetros de simulação	100
4.3.3	Investigando os modos elétricos e a resposta em frequência	104
4.4	Simulação da excitação mecânica	111
4.4.1	Parameter Sweep	111
5	Cálculos de sensibilidade e ruídos	113
5.1	Sensibilidade às variações no comprimento do detector	113
5.2	Cálculo da incerteza do limite quântico padrão	114
5.3	Cálculo da incerteza devido às variações térmicas (Ruído de Nyquist)	115
5.4	Minimização dos efeitos térmicos de nyquist	116
5.5	Sensibilidade ao espectro de frequências	117
6	Conclusões e propostas futuras	119
6.1	Propostas futuras	121
	Referências	122

1 INTRODUÇÃO

As OG (Ondas Gravitacionais) foram previstas por Albert Einstein através da sua TRG (Teoria da Relatividade Geral) em 1916, entretanto, apenas hoje, foram realizadas medições de maneira direta.

Diversos centros de pesquisas astronômicas travam uma busca pela observação direta da OG, e para tanto, estão sendo desenvolvidos e aprimorados instrumentos de medidas capazes de detectá-las.

No Brasil existe o Detector de Ondas Gravitacionais Mário Schenberg, que consiste de uma antena de massa ressonante esférica de $Cu(94\%)Al(6\%)$ com 65 cm de diâmetro, pesando aproximadamente 1.15 T, e todos os sistemas que possibilitam o seu funcionamento como detector de ondas gravitacionais (BORTOLI, 2011).

Até então, existiam apenas evidências sobre as OG, através de experimentos como a verificação de um Pulsar Binário PSR 1913+16 (HULSE e TAYLOR, 1975), que atribuiu o Prêmio Nobel de Física a Russell Hulse e Joseph Taylor da Universidade de Princeton em 1993, e uma descoberta, realizada no observatório BICEP2, que anunciara ter encontrado a primeira evidência direta para a inflação cósmica (ADE, AIKIN, *et al.*, 2014), um padrão identificado na radiação cósmica de fundo causado pela interação dessa com OG primordiais.

A detecção direta de OG ainda era um dos principais desafios da ciência, tão logo em 14 de setembro de 2015 ambos os detectores gêmeos do LIGO (Observatório Interferométrico de Ondas Gravitacionais), localizados em Livingston, Louisiana, e Hanford, Washington, nos EUA, observaram ondulações no tecido espaço-tempo que teriam sido causadas por OG chegando a Terra. Os astrofísicos concluíram que isso se originou de um evento cataclísmico que ocorreu no universo distante devido à colisão de um sistema binário de Buracos Negros que se fundiram liberando energia na forma de OG, confirmando assim uma das previsões da TRG, além de caracterizar como sendo eficaz o método de detecção por interferometria a laser, esse evento ficou conhecido por GW150914.

O LIGO foi originalmente proposto como meio de detectar estas OG nos anos 1980 por Rainer Weiss, Kip Thorne, Richard P. Feynman, e Ronald Drever (ABBOTT, *et al.*, 2016).

Apesar de detectarem essa OG, os dados coletados são insuficientes para se confirmar que a velocidade de propagação se deu na velocidade da luz, principalmente devido ao fato de não se possuir um referencial da fonte de onde se originou o evento.

Os sinais gravitacionais interagem fracamente com a matéria, o que torna difícil a sua detecção, contudo, vários grupos de pesquisa ao redor do mundo estão desenvolvendo detectores cada vez mais sensíveis para tentar compreender a interação desses sinais com a matéria.

Os DOG (Detectores de Ondas Gravitacionais) encontrados atualmente são de dois tipos: os interferométricos e os de massa ressonante.

Os DOGI (Detectores de Ondas Gravitacionais Interferométricos) consistem de dois braços ortogonais, cujas extremidades, isoladas vibracionalmente, possuem massas com espelhos suspensas. As massas são separadas cerca de 1 km ou mais. Um laser de alta potência é ajustado de maneira que seu feixe, situado na origem dos braços, é refletido através dos espelhos que se encontram nas massas nas outras extremidades, dessa forma, um divisor de feixes recombina-os, de maneira que a interferência causada pelos sinais se dê de forma destrutiva, assim, quando o comprimento dos braços varia devido à interação com OG, uma diferença de fase fará com que a amplitude da luz mude nos fotodetectores instalados (PADOVANI, 2012). Joseph Weber foi um dos idealizadores dos DOGI utilizando interferômetros a laser (JU, BLAIR e ZHAO, 2000).

Os DOGMR (Detectores de Ondas Gravitacionais de Massa Ressonante) utilizam como antena uma massa sólida de formato cilíndrico ou esferoidal. Quando atingida por uma OG com a mesma frequência de seu modo quadrupolar, a antena é excitada e oscila. Os DOGMR atuais possuem transdutores eletromecânicos que convertem estas oscilações em sinais elétricos para que possam ser posteriormente analisados.

Entre 1960 e 1965, Joseph Weber também propôs um método que consistia na medição do tensor de Riemann através das deformações longitudinais em um cilindro de alumínio causadas devido à interação com sinais gravitacionais: esse é considerado hoje o primeiro DOGMR. O cilindro era monitorado através de cristais piezelétricos ligados em série colocados na forma de um cinturão na região central. Todo esse sistema operava em uma

câmara a vácuo sobre isolamento vibracional e à temperatura ambiente. Os DOGMR atuais são cerca de 10 mil vezes mais sensíveis que o originalmente concebido por Weber (PEREIRA, 2008).

As ondas eletromagnéticas possuem um comportamento já conhecido pela ciência, principalmente devido ao fato de se poder produzir, detectar e medi-las. Visualizando uma situação em que um molho de chave é atraído do solo por um ímã, pode-se notar que toda a força gravitacional exercida pela Terra não é suficientemente grande para manter as chaves presas ao chão, rapidamente o molho é atraído pelo campo magnético. Isso ocorre devido ao campo gravitacional interagir fracamente com a matéria e explica a necessidade de detectores com altíssimas sensibilidades.

Os DOG, até então desenvolvidos, possuem o foco na detecção de OG com um grande potencial de detecção. O SGMP pode ser produzido a partir do giro de massas, já a OG é produzida a partir de eventos de grandezas astronômicas como, por exemplo, o GW150914. Esses eventos não ocorrem com grande frequência no Universo.

A produção de SGMP (Sinal Gravitacional de Maré Periódico) é uma das proposições da pesquisa de Padovani (2012), cujo objetivo é a geração de SGMP para serem utilizados na calibração desses detectores. Os SGMP podem ser produzidos a partir da aceleração relativa entre massas, assim, forças de maré atuariam no detector excitando seus modos naturais.

Da mesma forma, o desenvolvimento de um gerador e de um detector para trabalharem em conjunto em um ensaio, focados na geração e detecção de um SGMP teoricamente conhecido, traria melhores conclusões a respeito da teoria envolvida com os sinais gravitacionais.

A descoberta da OG serve de estimulante para se delinear uma pesquisa a cerca das propriedades dos sinais gravitacionais. Outra proposta é o “Desenvolvimento de um experimento para medir a velocidade da interação gravitacional”. O objetivo é utilizar um SGMP, produzido por um gerador, e medido por um transdutor específico, para que esses dados sejam posteriormente analisados (PADOVANI, 2012).

Produzir, detectar e medir SGMP possibilitaria ampliar os conhecimentos relacionados à teoria envolvida com a propagação de OG, averiguando com precisão sua velocidade de propagação.

Os benefícios oriundos do resultado dessa pesquisa seriam:

- a detecção de OG demonstraria que o espaço-tempo não se curva apenas na presença de matéria, mas oscila quando a OG viaja através deste;
- a medição da velocidade de interação da OG, o que possibilitaria confirmar teorias relacionadas;
- a abertura de uma janela para a astronomia gravitacional, com a qual poderá sondar fenômenos e eventos astrofísicos que permanecem até agora longe de nossa observação.
- os detectores tipo massa-ressonante operando com sensibilidades além do limite quântico;
- pesquisas em criogenia em alto vácuo com grandes volumes e massas, em ultrabaixas temperaturas;
- transdução eletromecânica de sinais de vibração muito pequenos;
- materiais com QM (fator de Qualidade Mecânica) elevado;
- materiais com QE (Fator de Qualidade Elétrica) elevado;
- novas técnicas de conexão com fricção interna muito pequena;
- suspensões com alto isolamento vibracional;
- osciladores de micro-ondas com baixo ruído de fase;

Estes são apenas alguns dos possíveis benefícios a serem trazidos por essa pesquisa.

1.1 OBJETIVO

Essa pesquisa pretende viabilizar o desenvolvimento de um experimento para medir a velocidade de interação gravitacional.

O trabalho tem por objetivo desenvolver um detector, para trabalhar em conjunto com um “Gerador de Sinais Gravitacionais de Maré Periódicos” em um “Ensaio para a Medida da Velocidade de Interação Gravitacional” (PADOVANI, 2012). Dessa forma o detector será utilizado para detectar os sinais de maré provenientes desse gerador.

Esse detector deverá ser constituído por uma antena do tipo massa ressonante sólida na forma de uma barra cilíndrica feita de safira, suspensa por um fio de nióbio contendo um sistema de supressão de vibrações e acondicionada sob uma cavidade metálica, a vácuo, refrigerada a 4 K.

Essa antena será capaz de detectar SGMP com uma frequência central de 27191 Hz e banda de 33.33 nHz, (Padovani 2012, previa uma frequência de 3200 Hz para o teste do detector Mário Schenberg), uma faixa de frequência que corresponderá a um de seus modos naturais de vibração.

O gerador proposto será constituído de massas conectadas através de um braço a um eixo que irá girar através da propulsão de um motor. A interação entre essas massas do gerador produzirá um SGMP cuja faixa de frequência de operação está dentro daquela detectada pela antena. A análise dos resultados desse detector possibilitará comprovar informações a respeito da interação dos sinais gravitacionais com a matéria (PADOVANI, 2012).

1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para o desenvolvimento desse detector, alguns objetivos específicos deverão ser alcançados e serão alvos dessa pesquisa:

- Avaliar o comportamento de uma geometria cilíndrica de safira com dimensões que viabilizem o desenvolvimento do projeto visto às disponibilidades dos materiais no mercado;
- Determinar as fontes de ruído presentes nos sistemas que compõem o detector;

- Determinar a arquitetura do sistema;
- Realizar a verificação da resposta em frequência do sistema de transdução paramétrica levando em consideração as fontes de ruído e as propriedades físicas dos materiais escolhidos;
- Determinar o melhor acoplamento mecânico entre a suspensão e o detector;
- Determinar o tipo de suspensão e avaliar o coeficiente de segurança do material utilizado que indica se os materiais envolvidos suportam os esforços envolvidos.

1.2 METODOLOGIA

A seguir serão apresentadas as metodologias aplicadas nesse trabalho:

1.2.1 ANÁLISE NUMÉRICA UTILIZANDO RECURSOS COMPUTACIONAIS

Será utilizado o Método dos Elementos Finitos para a investigação das respostas harmônica e estática mecânica do protótipo através do uso do software ANSYS®.

Para levantar a resposta em frequência da excitação elétrica será utilizado o Método das Diferenças Finitas no Domínio da Frequência, para a solução dos problemas de eletromagnetismo que envolva as equações de campo de Maxwell, dessa forma será feito o levantamento da resposta em frequência à excitação elétrica do detector modelado no ANSYS®, utilizando-se do software CST Microwave Studio®.

1.2.2 PESQUISA RELACIONADA À APLICAÇÃO DE MATERIAIS

Consiste na confirmação bibliográfica dos melhores materiais e tratamentos necessários para a obtenção das propriedades mecânicas e elétricas necessárias para o projeto do transdutor.

1.2.3 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DO PROTÓTIPO PROPOSTO

Primeiramente serão realizados estudos sobre a resposta em frequência e estática do sistema de transdução paramétrica composto pelo cilindro utilizado como massa ressonante e sua interação com micro-ondas e sinais gravitacionais, dentro das limitações impostas pelos

materiais utilizados em sua fabricação, visando estabelecer relações e maximizar a taxa sinal/ruído existente no sistema.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em Seis Capítulos. No Capítulo – 1 é descrito um breve histórico sobre os métodos já utilizados para a detecção de Sinais Gravitacionais.

No Capítulo – 2 descrevem-se a ciência das OG, suas principais características, uma possível forma de se gerar os SGMP, os principais mecanismos utilizados na transdução elétrica desses sinais e os principais sistemas necessários para um detector.

No Capítulo – 3 são apresentados a descrição sobre a simulação mecânica, os procedimentos necessários para a execução da análise utilizando o ANSYS®, a resposta de excitação harmônica, a análise da influência da temperatura na modificação da posição dos modos naturais, o coeficiente de segurança do fio da suspensão, o cálculo da frequência central do modo de interesse e seu QM.

No Capítulo – 4 uma análise semelhante àquela apresentada no capítulo anterior é realizada em relação a análise elétrica do modelo computacional utilizando-se o CST Microwave Studio®, dessa forma será avaliada os modos elétricos e a resposta em frequência elétrica para uma excitação mecânica.

No Capítulo – 5 são apresentados os dados relativos á sensibilidade de detecção e fontes internas de ruído.

No Capítulo – 6 são apresentadas a conclusão e a proposição de trabalhos futuros.

2 A CIÊNCIA DA ONDA GRAVITACIONAL

As OG's são perturbações na métrica do espaço-tempo provocadas pela aceleração relativa entre massas de forma que a derivada segunda do momento de quadrupolo não seja constante.

Einstein previu teoricamente essa a OG como uma solução radiativa para as equações de campo da TRG no vácuo, essa solução resulta em equações que descrevem sistemas não-lineares, e que existem poucas soluções exatas e para poucos casos (RIBEIRO, 2003).

Einstein descreveu o campo gravitacional como a curvatura da “superfície” do espaço-tempo causada pela presença de massa, portanto qualquer aceleração das massas nesse sistema poderá causar distúrbios conhecidos por ondas gravitacionais.

2.1 TIPOS DE APROXIMAÇÃO DA SOLUÇÃO RADIATIVA DAS EQUAÇÕES DE CAMPO DA TRG NO VÁCUO

A equação de campo da TRG formulada por Einstein é reproduzida a seguir (1) (EINSTEIN, 1916):

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi\frac{G}{c^4}T_{\mu\nu} + \lambda g_{\mu\nu} \quad (1)$$

Onde:

$R_{\mu\nu}$: representa a curvatura do espaço-tempo (tensor de Ricci)

$T_{\mu\nu}$: é o tensor momento-energia

$g_{\mu\nu}$: é a métrica do espaço-tempo

R : é o escalar de curvatura

G : é a constante universal da gravitação

c : é a velocidade de propagação da luz no vácuo

$\lambda g_{\mu\nu}$: é o termo da constante cosmológica

Existem dois tipos de aproximações destas equações: (i) aproximação pós Newtoniana, que considera partículas ligadas por forças gravitacionais que se movem

lentamente e (ii) aproximação de campo fraco, que considera um campo gravitacional fraco, não fazendo nenhuma consideração sobre a velocidade com que a partícula esteja se movendo neste campo.

Algumas teorias preveem que as OG's se propagam na velocidade da luz, mas em outras teorias de gravitação é possível obter resultados diferentes para a velocidade da OG (RIBEIRO, 2003).

2.1.1 TIPOS DE POLARIZAÇÃO DAS OG'S

As OG's apresentam dois tipos de polarização chamados de “+” (mais) e “x” (xis).

A força induzida pelas OG's e sinais gravitacionais é estritamente transversa, significa que o trabalho sempre será realizado perpendicular a seu eixo de deslocamento, o que sugere que uma OG plana se propagando na direção z de um anel de massa infinitesimal, conforme a Figura 1, faria uma distorção desse anel nos eixos x e y (RIBEIRO, 2003).

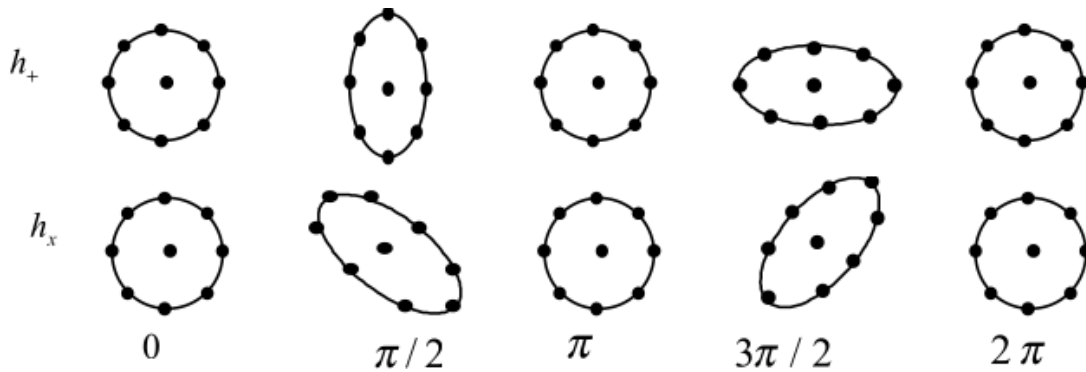


Figura 1: A distorção de um anel de partículas teste durante um ciclo de uma onda propagando-se na direção z. O efeito de ambas as polarizações lineares é mostrado. Fonte: (ANDRADE, 2004).

2.2 A GERAÇÃO E A DETECÇÃO DO SINAL GRAVITACIONAL

Considerando o sistema proposto por Frajuca e Ruiz (2014), onde dois corpos de massas M giram fixos a um raio ‘a’ em torno de um eixo deslocado de uma distância ‘r’ de um sistema de detecção tal como o ilustrado na Figura 2 a seguir:

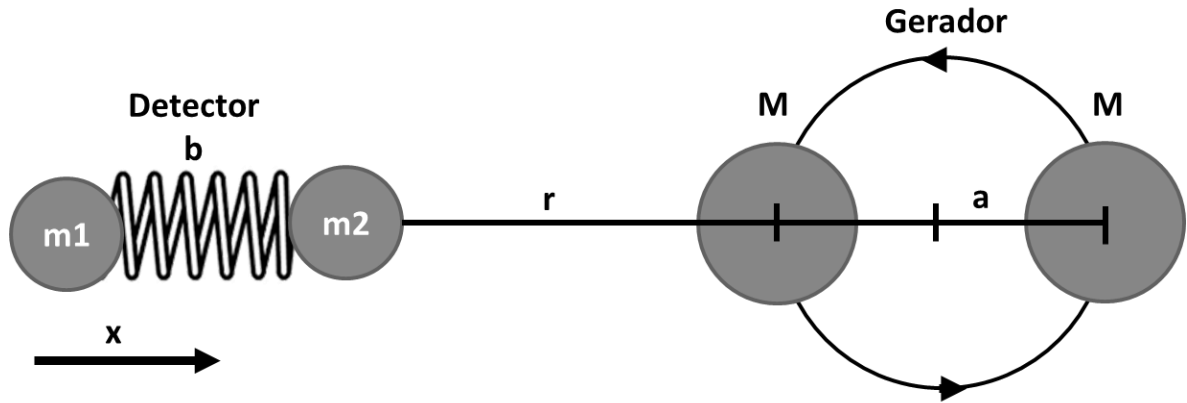


Figura 2: Destaque do modelo simplificado do detector e do emissor de sinais gravitacionais de maré periódicos.
 Fonte: Frajuca e Ruiz (2014);

Realizando a análise do sinal newtoniano gerado a partir dessas massas ‘M’ que giram e interagem com a matéria do detector, modelado a partir de um sistema simples formado por um conjunto de duas massas ‘m1 e m2’ deslocadas entre si de uma distância ‘b’ acopladas por uma mola, que representam a massa específica e o coeficiente de rigidez da matéria do detector, poderemos obter forças de interação de maré que serão causadas em ‘m1 e m2’ com intensidades diferentes devido à distância ‘b’, esse sistema formado por ‘m1 e m2’, apresenta-se na forma de um tipo de oscilador harmônico mecânico, que dada uma excitação externa cuja frequência seja a frequência fundamental desse sistema, o sinal de excitação será amplificado, devido à característica ressonante do material.

Considerando as excitações causadas pelo giro das massas ‘M’ do gerador sobre a massa ‘m1 e m2’, temos as forças de interação (Força de maré) sobre as massas ‘m1 e m2’ dadas respectivamente pelas Equações (2) e (3) (NAPOLEÃO, 2013):

$$F_{1x} = -GMm \left(\frac{1}{[r - a \cos(\omega t)]^2} + \frac{1}{[r + a \cos(\omega t)]^2} \right) \quad (2)$$

$$F_{2x} = -GMm \left(\frac{1}{[r - b - a \cos(\omega t)]^2} + \frac{1}{[r - b + a \cos(\omega t)]^2} \right) \quad (3)$$

Onde:

G : constante de Newton;

M : massa da esfera girante;

m : massa efetiva do detector;

ω : velocidade angular de rotação da massa;
 a : raio de rotação da esfera girante;
 r : distância entre o detector e a massa girante;
 b : comprimento efetivo do detector;

Após aproximações e associando as forças de interação sobre o sistema, temos o sinal mecânico de entrada variante no tempo, aplicado ao sistema oscilador dado pela Equação (4) (NAPOLEÃO, 2013):

$$F_{1x} - F_{2x} = \frac{-GMm 12 ab \cos(\omega t)}{r^4} \quad (4)$$

Dessa forma, aplicando esse sinal ao detector, considerando-o ele um oscilador harmônico com excitação forçada, tem-se a expressão para o sinal de saída dado por (NAPOLEÃO, 2013):

$$\frac{\Delta b}{b} = h = QGM \left(\frac{12ab}{r^4 \omega^2} \right) \cos(\omega t) \quad (5)$$

Onde:

Q : Representa o fator de qualidade mecânico do detector

G : constante de Newton

M : massa da esfera girante

ω : velocidade angular de rotação da massa

r : raio de rotação da esfera girante

a : distância entre o detector e a massa girante

b : comprimento efetivo do detector

h : sinal fornecido ao detector

2.2.1 O GERADOR DE SINAIS GRAVITACIONAIS DE MARÉ

Matone et al. (2007) descreveram um estudo sobre a utilização de geradores de sinais gravitacionais utilizados para realizarem a calibração de DOG's, gerando artificialmente sinais gravitacionais utilizados na calibração desses detectores. Nesse trabalho é apresentado

um estudo dos benefícios advindos da utilização de sinais gravitacionais gerados artificialmente.

Frajuca e Ruiz (2014) descreve a estrutura de um dispositivo capaz de gerar sinais gravitacionais de maré periódicos para fins de calibração do DOG Mário Schenberg. É descrita a estrutura básica desse gerador composto por duas massas girantes acopladas ao eixo de um motor de relutância variável. São realizadas análises sobre os aspectos relacionados à utilização desse tipo de motor, apresentando características vantajosas e desvantajosas, chegando a conclusão que um motor de relutância variável deverá ser projetado para atingir uma rotação de 1600 Hz e deverá possuir sistemas de amortecimento vibracional, sistema para possibilitar irradiação de calor, sistema de controle de velocidade, sistema de mancais magnéticos devido ao uso em vácuo, o que impossibilita a utilização de lubrificantes, sistema de controle de posicionamento e velocidade, além de propor um método de fixação das massas girantes por meio de fibras de carbono, que apresenta robustez e confiabilidade.

2.2.2 DETECTORES DE SINAIS GRAVITACIONAIS DE MARÉ TIPO BARRA RESSONANTE

O primeiro DOG foi idealizado por Weber (1960-1965), e consistia de uma barra cilíndrica de alumínio cuja sensibilidade era cerca de 10000 vezes menor que a sensibilidade de DOG's desenvolvidos com as tecnologias atuais.

Em um dos capítulos de sua dissertação, Andrade (2004), descreve detalhadamente, o princípio de operação de um DOG e um transdutor paramétrico, analisando suas vantagens e desvantagens. Propõe diversos modelos de DOGBR (Detector de Onda Gravitacional tipo Barra Ressonante), passando pelo DOGBR de três modos, que utiliza um sistema de transdução passiva, onde amplificadores SQUID (Superconducting Quantum Interface Device) são utilizados para amplificar os sinais de um transdutor “indutivo supercondutivo”; até modelos DOGBR utilizando transdutores paramétricos acoplados, onde, um gerador de sinais de micro-ondas de baixíssimo ruído de fase, injeta um sinal de 10 GHz de frequência em um circulador, que envia e recebe esses sinais de uma cavidade reentrante, existente no corpo da antena do detector, através de antenas “microstrips”. Quando vibrações ocorrem na antena, essa, por sua vez, modula a frequência ressonante do transdutor, o qual modula o sinal proveniente do gerador de sinais, o que produz “sidebands” no espectro do sinal. Esse sinal então volta através do circulador e é demodulado, suprimindo-se a portadora (sinal do

gerador), dessa forma não se saturam os amplificadores de micro-ondas utilizados e apresenta-se apenas o sinal correspondente à interação da antena com os sinais gravitacionais.

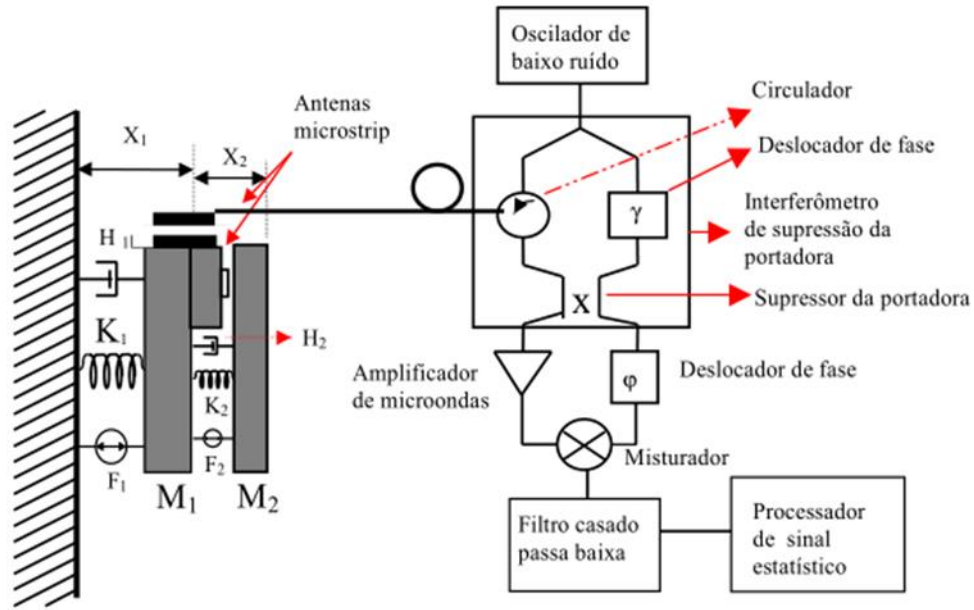


Figura 3: Modelo completo de um detector de ondas gravitacionais do tipo barra ressonante de dois modos, acoplado a um transdutor paramétrico do tipo cavidade reentrante. Fonte: Adaptação de Andrade (2004) da figura de Tobar (1998)

O modelo descrito por Andrade (2014) refere-se ao detector desenvolvido por Tobar (1998) na Universidade de Western Austrália (UWA).

Em sua tese Andrade (2014) afirma que o uso de transformadores mecânicos de amplitude possibilita a utilização de massas menores na antena que compõe o detector, aumentando o acoplamento eletromecânico, produzindo amplificação mecânica do sinal e também aumentando a banda de frequência de detecção. O primeiro a propor o uso de transformadores mecânicos de amplitude foi J. P. Richard (1984). Foi mostrado por ele que se um sistema de três ressonadores harmônicos, como o mostrado na (Figura 4), for resolvido pelo método tradicional de pequenas vibrações, onde $\mu_1 \ll 1$ é a razão das massas do segundo corpo e do primeiro, e $\mu_2 \ll 1$ é a relação entre a massa do terceiro corpo e do segundo. Fazendo-se $\mu = \mu_1 = \mu_2$ obtemos as soluções para as frequências características do sistema:

$$\omega_- = \omega_0(1 - \sqrt{\mu}) \quad (6)$$

$$\omega_c = \omega_0 \quad (7)$$

$$\omega_+ = \omega_0(1 + \sqrt{\mu}) \quad (8)$$

Onde:

ω_- : frequência do limite esquerdo da banda

ω_c : frequência central da banda

ω_+ : frequência do limite direito da banda

ω_0 : frequência característica do sistema

μ : razão entre as massas do sistema

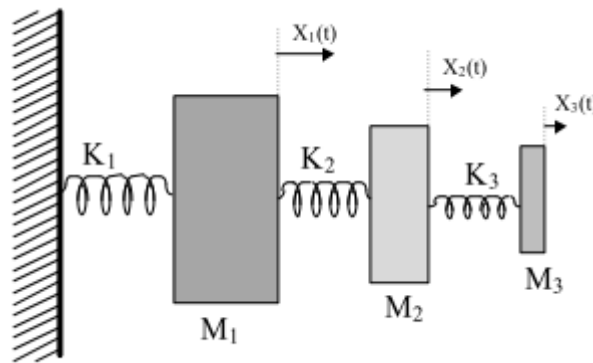


Figura 4: modelo de sistema de três modos. Fonte: J. P. Richard (1984).

M_1 , M_2 , M_3 , K_1 , K_2 , K_3 , $X_1(t)$, $X_2(t)$, $X_3(t)$ são as massas, constantes de mola e deslocamentos dos primeiro, segundo e terceiro modos respectivamente.

Supondo-se a conservação de energia entre as massas intermediárias, a transformação mecânica das amplitudes é dada por:

$$\frac{|x_3|}{|x_1|} = \sqrt{\frac{M_1}{M_2}} \quad (9)$$

O sistema de multimodos apresenta duas vantagens. A primeira é a possibilidade de utilizar uma massa final mais leve para a operação de transdutância, causando um aumento no acoplamento eletromecânico e uma maior amplificação mecânica. A segunda é a de propiciar

uma maior separação entre os modos, o que aumenta a banda de detecção. Associando ressonadores em série percebe-se que a largura de banda aumenta, mas uma análise apresentada por Price (1987) mostrou que o aumento do número de modos indo de um até três faz com que a largura de banda de detecção aumente rapidamente, enquanto que um aumento no número de modos a partir de três trará pequenos incrementos. Aumentar o número de modos é uma tarefa que requer que os materiais envolvidos possam ser acoplados mecanicamente, sem que se comprometa o QM da estrutura.

Todos os detectores apontados nas pesquisas relacionadas foram desenvolvidos com o intuito de se detectar sinais gravitacionais oriundos de ondas gravitacionais; no entanto, as tecnologias empregadas nesse contexto podem ser adaptadas de tal forma a atender as necessidades do projeto do DSGMP (Detector de Sinal Gravitacional de Maré Periódico). A construção desse detector é baseada em um cilindro feito de material de alto QM, cujo princípio de funcionamento baseia-se nas tecnologias empregadas no desenvolvimento desses detectores citados, o material que será empregado na construção desse detector deverá, além de possuir um alto QM deverá possuir um alto QE, dessa forma, não será necessário o emprego de transdução utilizando técnicas multimodo por meio de amplificadores mecânicos.

2.2.2.1 ESCOLHA DO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO DO DETECTOR TIPO BARRA RESSONANTE

A escolha do material utilizado para o desenvolvimento do detector é um fator que influi na determinação da sensibilidade dele. O material escolhido deverá possuir alta densidade e permitir que o som se propague em grandes velocidades com baixíssimas perdas acústicas (JU, BLAIR e ZHAO, 2000). A principal contribuição de Weber (1968) envolve o desenvolvimento de detectores com massas ressonantes utilizando-se de materiais com alto QM, isso possibilitou a redução de perdas mecânicas na própria antena.

A relação entre o sinal e o ruído captado pela antena deve ser maximizada. A maximização dessa taxa deve ser realizada de tal maneira que a amplitude do sinal detectado seja limitada apenas por limites quânticos, assim, a antena se tornará menos susceptível a interferências causadas pelas fontes de ruídos.

Um dos problemas envolvidos com o desenvolvimento do detector relaciona-se justamente com a minimização da função de ruído. O ruído, seja ele proveniente de qualquer fonte, é um inconveniente presente no sistema e impossível de ser totalmente extinto, sendo assim, ele deve ser atenuado a níveis de amplitude que não se sobressaíam ao sinal gravitacional de interesse, de certa forma sem causar grandes interferências.

Neste projeto existem várias fontes de ruído e que devem ser estudadas em trabalhos futuros. Podem ser relacionadas algumas fontes que causariam interferências elétricas ou mecânicas, como por exemplo: ruídos térmicos (devido à agitação térmica das partículas da suspensão e do próprio detector), ruído proveniente do sistema de refrigeração (devido à evaporação de gases que fazem parte do processo de refrigeração), ruído eletrônico (proveniente do ruído de fase do gerador de micro-ondas), ruídos externos (podem ser destacados os ruídos sísmicos, sonoros, devidos às interferências de ondas eletromagnéticas, devidos à interferência de Raios Cósmicos) (ANDRADE, 2004).

Blair et al. (2000), modelaram o ruído de um sistema de detecção tipo barra ressonante utilizando transdução passiva, onde incluía amplificadores elétricos.

Chegando a conclusão que para um bom desempenho do sistema, com menos susceptibilidade ao ruído era necessário:

(a) Reduzir a temperatura da antena. Isso é necessário para se reduzir os níveis de ruídos térmicos oriundos do ruído Browniano. Isso é possível com o estado da arte em criogenia, onde refrigeradores por diluição são empregados para a refrigeração de massas, a fim de se obter supercondutividade ou baixos ruídos térmicos.

(b) Uso de transdutância direta de valores elevados e transdutância reversa de valores extremamente baixos.

(c) Uso de amplificadores com baixíssima densidade espectral de ruído de tensão e correntes de entrada. Isso é possível por meio do uso de amplificadores SQUID (CLARK, J. 1986).

(d) Redução das perdas acústicas e perdas elétricas na antena para obtenção de altos QE, QM ou longo tempo de relaxação. Isso é possível através do emprego de materiais com

altos QE e QM, e o uso de geometria mecânica que faça com que a frequência de ressonância da antena seja a mesma frequência do sinal gravitacional esperado. Além da adoção de sistemas de supressão vibracional no sistema de suspensão da antena.

(e) Obtenção de impedâncias de ressonância iguais entre a antena e o transdutor utilizado, para que o tempo de integração (τ_i) seja pequeno, de maneira que a antena não dissipe a energia do sinal captado abruptamente e o ruído térmico diminua.

Vale a pena destacar que estas ações anteriormente citadas são empregadas em detectores em que o elemento transdutor e o elemento detector são duas coisas distintas. Nestes casos são adicionados ao corpo do detector transdutores que medem as deformações mecânicas causadas pela interação do detector com OG. Na pesquisa apresentada neste trabalho o elemento detector também compõe o sistema de transdução.

Ju et al. (2000) no Departamento de Física da Universidade de Western Austrália descreve os materiais candidatos a serem utilizados no sistema de transdução dos DOGBR's, destacando na pesquisa deles "Detection of gravitational waves" os melhores materiais e suas respectivas propriedades, essas propriedades são destacadas na Quadro 1 que segue:

Quadro 1- Propriedades Físicas dos Materiais candidatos					
Material	$\rho(g\ cm^{-3})$	$v_s(km\ s^{-1})$	Q	ρv_s^3 ($10^{13}kg\ s^{-3}$)	$Q\rho v_s^3$ ($10^{20}kg\ s^{-3}$)
Alumínio 6061	2,7	5,1	5×10^6	36	18
Alumínio 5056	2,7	5,1	7×10^7	36	25
Nióbio (Nb)	8,57	3,4	2.3×10^8	34	800
Silício (Sc)	2,33	8,5	2×10^9	140	2.8×10^4
Safira (Al_2O_3)	3,98	9,4	3×10^9	330	105
Chumbo (Pb)	11,36	1,1		1,5	
Tungstênio (W)	18,8	4,3		150	
Cobre (94)/Al(6)	8,0	4,6	2×10^7	77,8	155

Fonte: Ju et al. (2000);

Onde:

ρ : Densidade do Material

v_s : Velocidade de propagação do som no material

Q: Fator de qualidade mecânica (o ruído térmico aproxima-se a Q-1)

ρv_s^3 : Aproximação da taxa de energia absorvida

$Q\rho v_s^3$: Relação sinal ruído

Para minimizar a função que relaciona o sinal com o ruído da antena será necessário à utilização de um material cujo produto $Q\rho v_s^3$ seja o maior possível, dessa forma a amplitude do ruído térmico do transdutor não será superior à amplitude do sinal de excitação. De acordo com o Quadro 1, os materiais candidatos são a safira e o silício, porém, para que haja um grande acoplamento eletromecânico o QE do material deve ser o maior possível, dessa forma a safira é o material que melhor se destaca em relação ao silício, por isso foi o material escolhido para o desenvolvimento da pesquisa, porém o estado da arte na fabricação artificial dela ainda encontra-se em um estágio que limita a obtenção de peças de safira com comprimentos convenientes, esse fato irá limitar o desenvolvimento do transdutor em função do comprimento da barra de safira disponível. Como será visto mais adiante o comprimento da barra de safira determinará a frequência de detecção do sinal gravitacional de maré que deverá ser gerado pelo “Gerador de sinais gravitacionais de maré”, alvo da pesquisa relacionada com Paulo Fernandes Junior (2015), onde cita a utilização de um gerador de sinais gravitacionais que será utilizado na calibração do detector Schenberg.

2.3 MECANISMO DE TRANSDUÇÃO

A frequência de ressonância acústica do cilíndrico de safira utilizado, determinada através do software de análise pelo MEF (Método dos Elementos Finitos) (do Inglês Finite Element Method, FEM) ANSYS® está em torno de 27191 kHz. Como o detector de safira se comporta como um ressonador mecânico, conforme o cristal ressoa suas dimensões mudam e agem forças internamente. Dessa forma, dois mecanismos de transdução atuam: (a) a alteração nas dimensões no cristal devido às oscilações alterarem suas dimensões, e (b) tais alterações induzem mudanças na permissividade dielétrica alterando os modos elétricos.

Além de o cristal fazer parte do sistema de detecção do SGMP, ele também é utilizado no sistema de transdução, visto que quando suas dimensões são alteradas suas propriedades dielétricas se alteram, dessa forma esse efeito é utilizado como parâmetro em um circuito ressonante. Quando a permissividade dielétrica muda, altera-se a capacitância do circuito alterando-se sua resposta em frequência, esse mecanismo realiza a transdução paramétrica do SGMP.

As forças de excitação sob o transdutor são provenientes do SGMP, que causam distorções longitudinais na barra de safira. O sinal gravitacional de maré excita mecanicamente o detector (a barra de safira) causando forças de tração e compressão que oscilam na frequência de ressonância da barra, excitando seus modos acústicos, fazendo com que ela ressoe modificando suas dimensões. Consequentemente as oscilações causadas devido ao efeito ressonante acústico causam as distorções longitudinais que alteram a permissividade dielétrica da barra de safira. Esse efeito é utilizado através do uso de transdução ativa.

Para a realização da transdução ativa utiliza-se o sinal de micro-ondas gerado por um gerador de sinais de micro-ondas. Esse sinal é então injetado e coletado, nesse caso, as distorções longitudinais no transdutor causam uma mudança na constante dielétrica da safira, assim, um sinal de micro-ondas aplicado no cristal ao ser coletado dele sofre uma mudança de amplitude e fase devido às alterações na constante dielétrica. Esse efeito é denominado transdução paramétrica, onde um parâmetro elétrico, no caso a constante dielétrica, é alterado causando uma modulação na capacitância do sistema. Isso só é possível, pois as distorções mecânicas causadas devido a interação do SGMP com o transdutor, causam mudanças nos modos de ressonância eletromagnética do transdutor, esse fenômeno é ilustrado Figura 5:

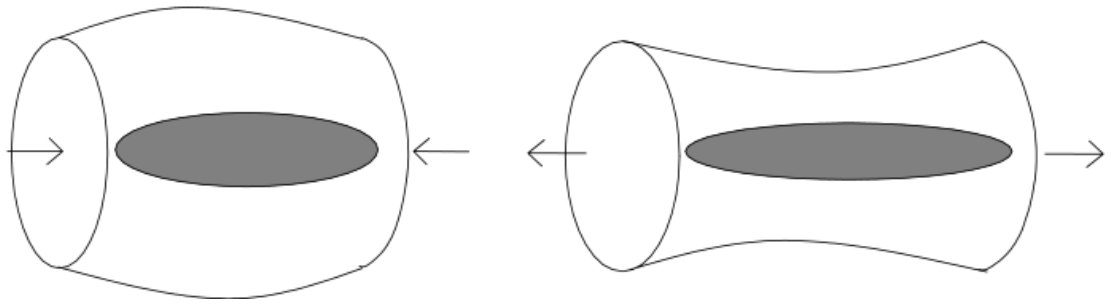


Figura 5: Distorções radiais e longitudinais causadas pelo SGMP que atravessa o transdutor e produzem forças de tração e compressão que excitam um dos modos mecânicos, essas oscilações alteram a frequência da ressonância eletromagnética (Mostrada como a região escura da figura).

O efeito paramétrico pode ser modelado utilizando um análogo de circuito elétrico que usa a ressonância mecânica da barra de safira para modular a capacitância em um circuito RLC (Resistor, Indutor e Capacitor) alimentado pelo gerador de sinais de micro-ondas.

A fim de se realizar um modelo que represente a planta do transdutor consideremos o modelo a seguir da Figura 6 desenvolvido por Locke et al. (1998):

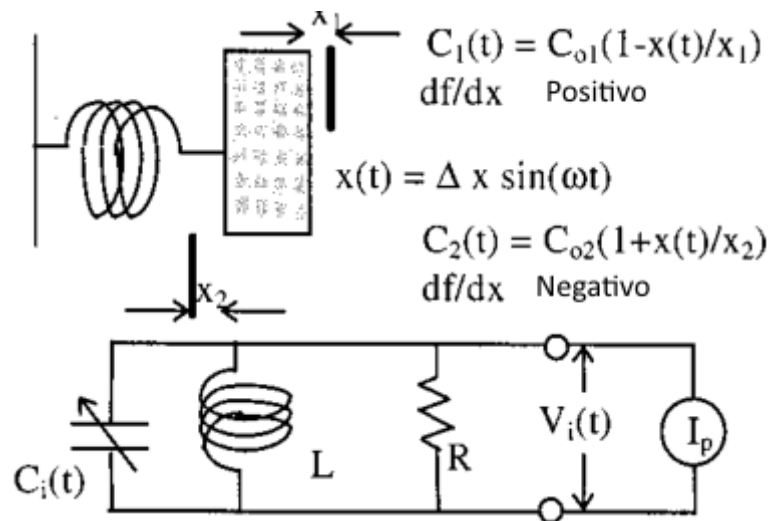


Figura 6: Modelo equivalente de circuito com capacitância modulada, a capacitância do circuito muda devido aos deslocamentos relativos de massa do detector. Fonte: Locke et al. (1998)

Nesse modelo, os deslocamentos relativos da massa do detector, causarão mudanças no valor da capacitância C_i , o gerador de sinais de micro-ondas foi modelado como sendo uma fonte de corrente constante I_p , o sinal de saída do sistema é representado pela tensão elétrica V_i , dessa forma, o circuito forma um oscilador harmônico cuja frequência é modulada pela capacitância C_i em função dos deslocamentos relativos da massa, isso faz com que no espectro de frequências, na presença de excitação mecânica na frequência de um dos modos

naturais do detector, o espectro de V_i apresentará bandas laterais, visto que a modulação da capacitância também se dá de forma harmônica devido às oscilações mecânicas da massa do detector.

2.4 ESCOLHA DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

Para que o sistema funcione de forma estável, é necessário que todo tipo de interferência seja atenuada. Devido o transdutor possuir uma massa sujeita a efeitos térmicos, que causam tensões mecânicas internas interferindo nos modos naturais da peça de safira, surge o ruído Browniano, proveniente da interação entre as partículas que compõem a matéria do transdutor. Esse efeito deve ser atenuado em grande escala, e para isso a peça do transdutor deve ser resfriada a baixas temperaturas.

A refrigeração por hélio líquido deve fornecer condições necessárias para a detecção planejada.

Um sistema de refrigeração, composto por um refrigerador por diluição, poderia ser empregado para conseguir este efeito, atenuar o ruído térmico proveniente do efeito Browniano. Esse sistema de refrigeração trabalha com temperaturas em torno de 50mK. Essa redução de temperatura confere uma diminuição do ruído Browniano e melhora as características elétricas do material da antena, porém introduz ruído vibracional devido à evaporação do He dentro do refrigerador, o que, após analisado poderá impossibilitar a utilização de tal refrigerador.

2.5 ESCOLHA DO SISTEMA DE SUSPENSÃO

A peça de safira utilizada como transdutor deverá ser suspensa. O sistema de suspensão será composto por elementos restauradores (massas-mola) de maneira que funcionem como filtros passa-baixa atenuando uma faixa de frequências de oscilações (instabilidade). O sistema de suspensão está apoiado à terra, o que leva a crer que ruídos sísmicos podem viajar através da suspensão e causar interferências mecânicas ao chegar à peça, dessa forma esse dispositivo deve ser desenvolvido pensando em atenuar também esse tipo de interferência.

Em sua tese Bortoli (2011) descreve o projeto de Casadores Mecânicos de Impedância, utilizados para atenuar as vibrações provenientes das interações sísmicas e do sistema de refrigeração por diluição do Detector de Ondas Gravitacionais Mário Schenberg.

O sistema de suspensão adotado deverá estar fixo ao transdutor de safira com a mínima fricção possível, para evitar tensões mecânicas no material. Para isso poderão ser utilizadas fibras feitas de nylon ou de safira, que não reduzirão significativamente o QM do sistema (LOCKE , C.R. et al., 2000).

2.6 ESCOLHA DO GERADOR DE MICRO-ONDAS

Para que possa ser feito o acoplamento eletromecânico de maneira que ocorra a transdução paramétrica do sinal gravitacional de maré, um gerador de sinais de micro-ondas irá gerar um sinal elétrico que será modulado pelo sinal gravitacional em amplitude e em fase, produzindo no espectro de frequência bandas lateral em torno da frequência do sinal injetado pelo gerador.

Esse gerador deverá produzir um sinal elétrico com grande estabilidade na frequência e na fase. Sua frequência deverá ser, de preferência, a mesma frequência cujo QE do material do transdutor se torne máximo e cujo comprimento de onda tenha o comprimento do transdutor, isso deve ser precavido para que a peça devolva energia devido ao efeito ressonante, como a capacitância do sistema muda quando um sinal gravitacional atravessa o transdutor, grande quantidade de energia estocada é devolvido, esse efeito provoca uma amplificação intrínseca do sistema, essa característica se torna importante, pois, dessa forma, amplificadores elétricos se tornam desnecessários, evitando-se assim o ruído de back-action proveniente dos circuitos amplificadores de sinal.

Deve ser realizados cálculos para se determinar a potência do sinal fornecido pelo gerador de sinais de micro-ondas para que o ajuste não provoque ruído de back-action proveniente dele, devido à entrega excessiva de potência ao transdutor, quando a amplificação paramétrica do transdutor já se torna suficiente.

2.7 GEOMETRIA DO TRANSDUTOR

A geometria do transdutor de safira será na forma de uma barra cilíndrica o mais massiva possível, mas outras geometrias poderão ser estudadas, e em relação à fabricação da safira, alguns cuidados devem ser tomados para que o QE e o QM sejam os maiores valores possíveis:

- a orientação do eixo C do cristal deve ser o mais paralela possível à orientação do eixo Z do cilindro, isso proporciona as características elétricas necessárias;

- a peça de safira não poderá apresentar bolhas no processo de fabricação, as bolhas diminuem a velocidade de propagação do som no material.

- o comprimento da barra deverá ser o maior disponível, isso irá viabilizar a construção do “Gerador de sinais gravitacionais de maré”, influenciando diretamente nas dimensões do projeto dele. Devido à disponibilidade da safira no mercado, onde seu comprimento apresenta-se com limitações de até 500 mm de comprimento, isso se dá devido à tecnologia de fabricação desse material, o gerador de sinais gravitacionais deverá atender a essas limitações. O valor do comprimento da barra deverá ser otimizado de acordo com a disponibilidade da matéria prima nos fornecedores.

3 SIMULAÇÃO MECÂNICA

Para se realizar o estudo do comportamento do detector de safira sobre a influência de um sinal gravitacional, adotou-se o formato cilíndrico para o detector, dado a facilidade de se encontrar peças de safira nesse formato no mercado especializado e apresentar um modo natural que se acopla ao SGMP além de possibilitar uma distribuição de massa que favorece a fixação do detector por meio de uma suspensão através da região central da peça. Para isso adotou-se a dimensão do diâmetro em relação ao comprimento dele o maior possível, de maneira a satisfazer o ganho de massa e a disponibilidade de compra desse material. O ganho de massa favorece na distribuição de modos naturais com frequências menores, dado que o sinal de excitação será proveniente de um gerador de sinais gravitacionais de maré periódicos, as frequências naturais de interesse acontecendo em valores os mais baixos possíveis, viabiliza a construção desse equipamento, visto que a velocidade de rotação das massas utilizadas poderá ser menor.

Para se reduzir ao máximo a fricção entre o detector e o material da suspensão optou-se por utilizar um fio para suspender a peça, a fim de se manter a menor área de contato possível entre ele e a superfície do detector diminuindo assim a fricção na região de contato entre os dois.

Para a realização da simulação computacional adotou-se como ferramenta a plataforma comercial de software ANSYS® que utiliza o MEF para a determinação dos parâmetros mecânicos importantes do projeto. Com ele foi realizado a modelagem CAD (*Computer Aided Design*) utilizando a ferramenta de desenho paramétrico integrado à plataforma.

3.1 DESENHO GEOMÉTRICO DOS SÓLIDOS – CILINDRO SEM FURO

Alguns rascunhos (*Sketches*) do modelo construído no ANSYS® serão descritos a seguir. Na Figura 7 pode-se observar o perfil do sistema de detecção, deixando exposta a peça de safira apoiada sobre o fio de nióbio que compõe a suspensão.

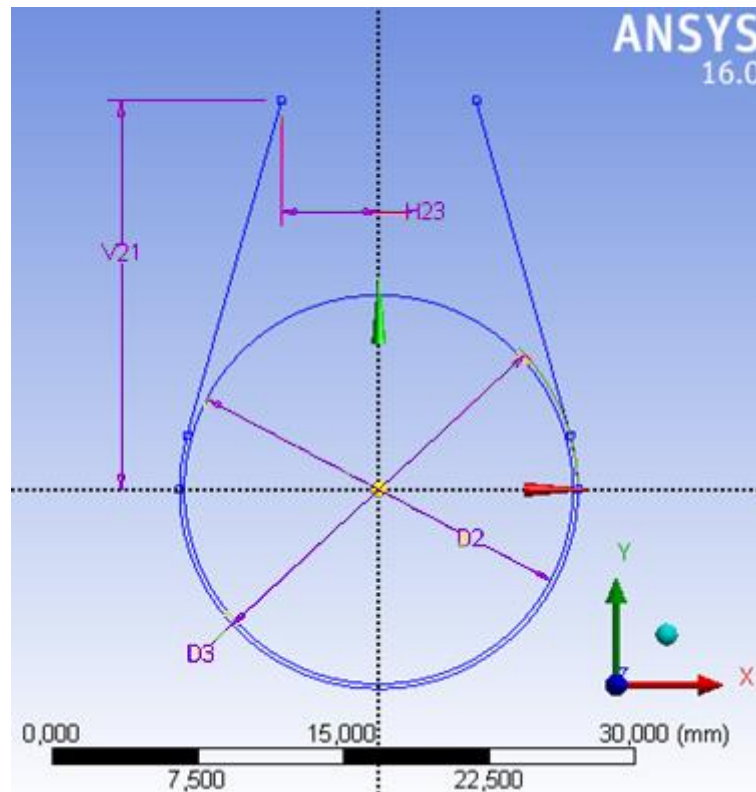


Figura 7 – Perfil da peça de safira e de sua suspensão, no detalhamento da figura a circunferência representa o cilindro de safira.

O fio que compõe a suspensão possui um volume dado pela revolução de uma área de circunferência de diâmetro D2 sobre a linha curva do perfil da Figura 7. Na Figura 8 pode-se observar o *Sketch* onde foi desenhado o diâmetro do fio da suspensão, pode-se observar uma cota V4 que é dada em relação ao eixo do cilindro do projeto.

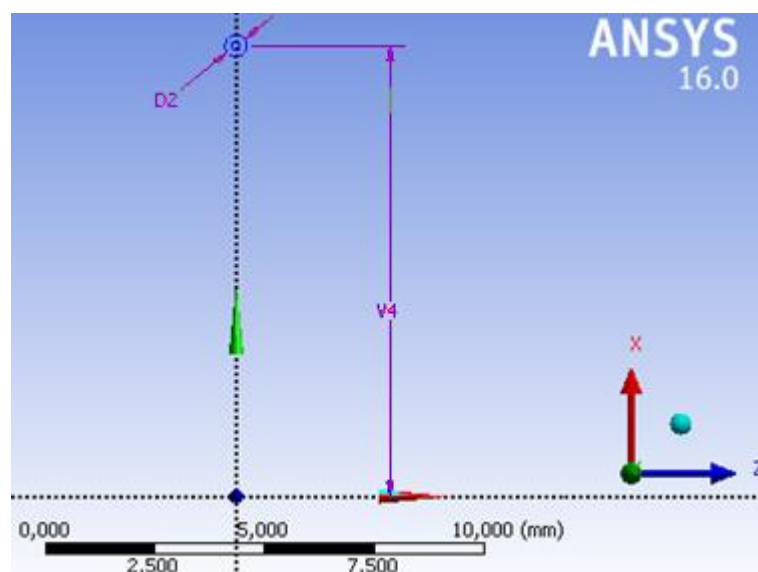


Figura 8 – Perfil do fio da suspensão, o fio encosta tangencialmente no cilindro de safira.

Logo após algumas operações de construção nos perfis obteve-se o sólido representado na Figura 9:

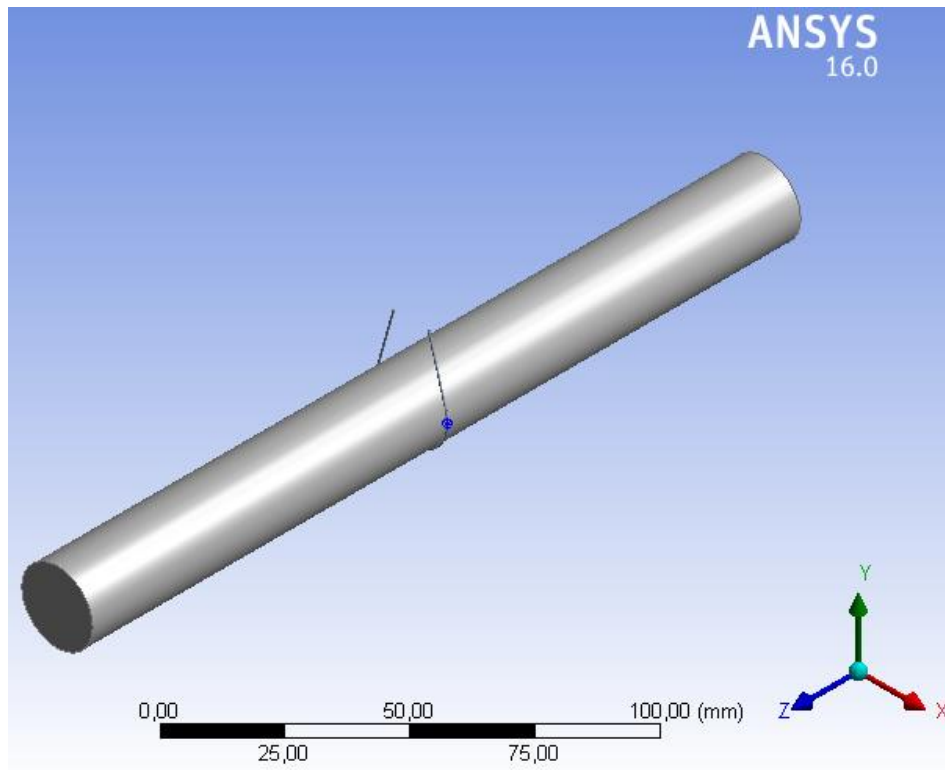


Figura 9 – Sólido construído a partir dos perfis desenhados nos *Sketches*

Pode-se observar em detalhes na Figura 10 e Figura 14 que o contato entre a superfície da suspensão e a superfície do cilindro de safira é feita através de um contato tangencial à superfície do cilindro, e para modelar os elementos finitos nessa região no ANSYS® há uma operação denominada “*Imprint Faces*” que deve ser realizada, a qual permite estabelecer a área de contato entre as partes que compõem o detector através de elementos finitos que permitem a configuração do coeficiente de fricção da zona de contato entre a suspensão e o cilindro de safira, essa operação marca a área de contato do cilindro quando não há interação mecânica significativa, por exemplo, quando a gravidade é nula, isso é um pré-requisito para que o software possa calcular transientes durante o processo de simulação e a deformação sofrida pelos sólidos após a interação de forças.

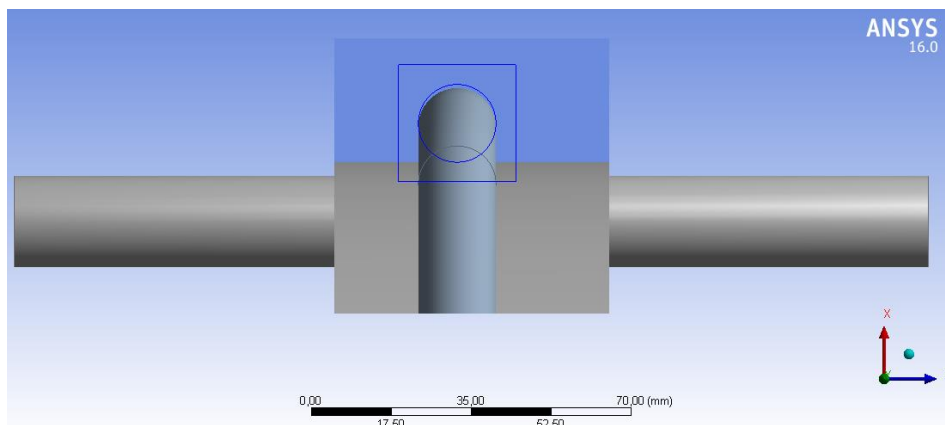


Figura 10 – Região detalhamento do contato tangencial entre cilindro e suspensão

A Figura 11 detalha a cota que determina o raio de contato entre as partes do sistema, a cota V4 depende do raio do cilindro:

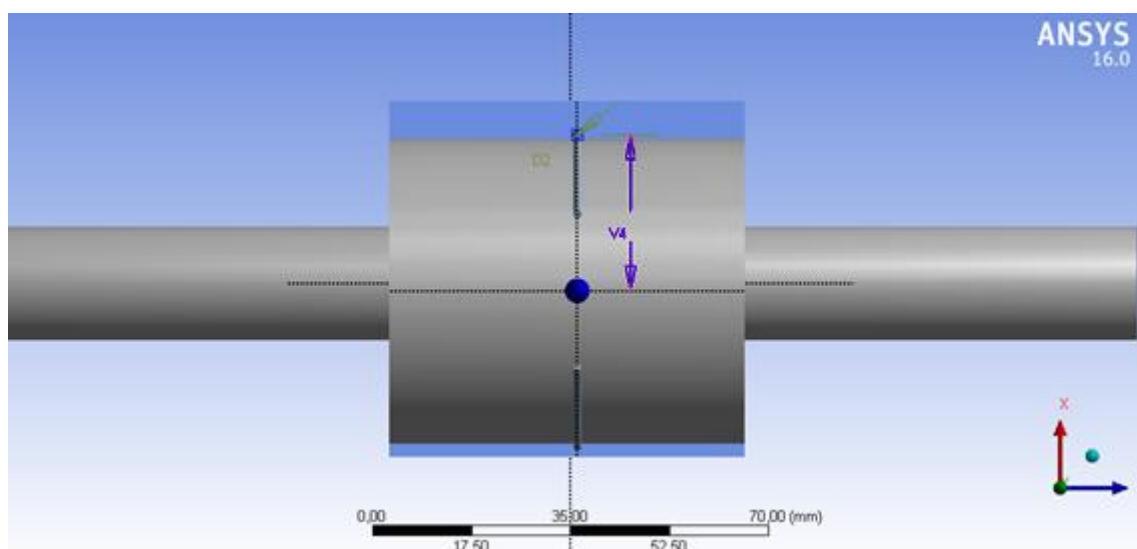


Figura 11 – Vista ampla do referencial entre o contorno do cilindro e a suspensão, a medida é realizada a partir do centro do diâmetro do fio, até o eixo do cilindro.

Na Figura 12 podemos observar em detalhe o posicionamento da cota V4 no centro do eixo do fio da suspensão.

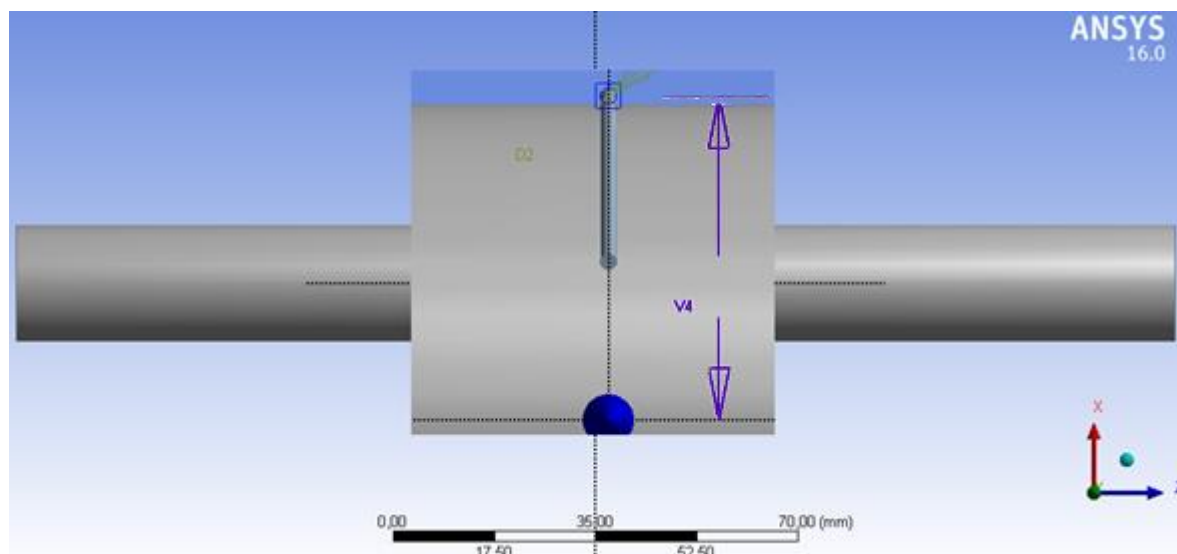


Figura 12 – Vista em aproximação do detalhe do raio de contato

Na Figura 13 pode-se observar o contato tangencial do fio na lateral do cilindro, esse contato não se dá em toda a extensão do raio, se limita até um ponto de contato devido à abertura do ponto de apoio do fio da suspensão, isso é fácil de ser observado através da Figura 14.

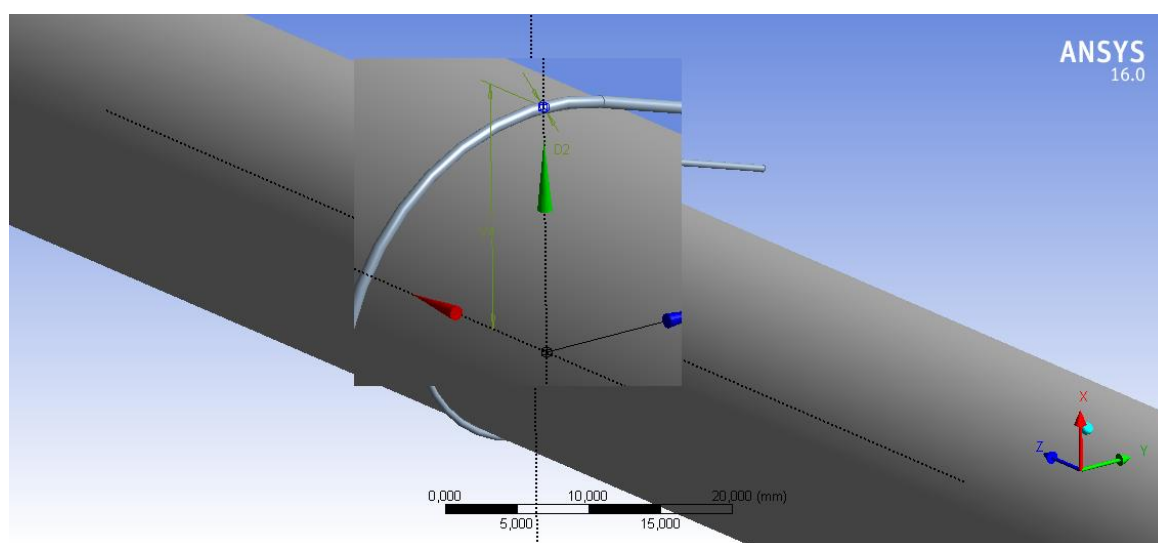


Figura 13 – Raio de contato entre suspensão e o cilindro

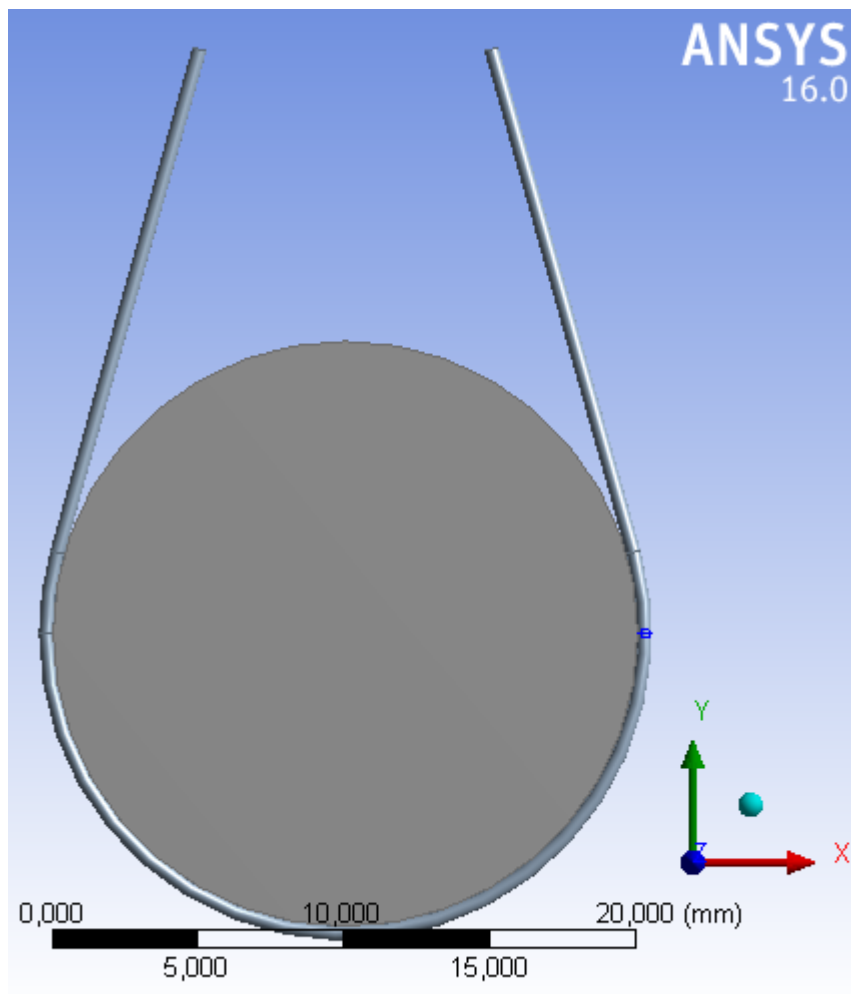


Figura 14 – Vista frontal do raio de contato entre a suspensão e o cilindro, o contato entre o fio e o cilindro é limitado pela abertura do ponto de fixação do fio, quanto mais aberto menor será a área de contato, isso é dado pela cota H23 na Figura 7

Na Figura 7 as cotas H23 e V21 limitam a área de contato do fio com o cilindro. A Figura 14 não destaca as cotas H23 e V21, porém a abertura entre as extremidades do fio e a distância do ponto de fixação (ou seja, a extremidade do fio) pode ser observada.

Quanto menor a área de contato, menor as perdas por fricção, contudo perde-se estabilidade do cilindro devido o aumento dos graus de liberdade da peça.

Alguns modos naturais intermediários aparecem devido ao aumento dos graus de liberdade da peça e da mudança de massa e comprimento do fio da suspensão, porém o modo de interesse no cilindro não muda de posição na frequência.

Optou-se por limitar a cota H23 de abertura para no máximo metade do valor do diâmetro do cilindro, e da mesma forma limitou-se a distância do ponto de fixação (que se dá na extremidade do fio da suspensão, cota V21) até o cilindro detector.

Durante a simulação observou-se que a mudança nesses parâmetros não comprometia a posição dos modos naturais na frequência, mas degradava-se o QM da estrutura devido ao acoplamento da frequência do modo de interesse no fio da suspensão. A frequência do modo também excitava o fio para alguns valores de comprimento. Essas medidas foram adotadas experimentalmente durante o processo de simulação, a fim de se reduzir as perdas no fio da suspensão.

Na Figura 15 fica destacado o posicionamento central do fio da suspensão em relação ao centro do cilindro.

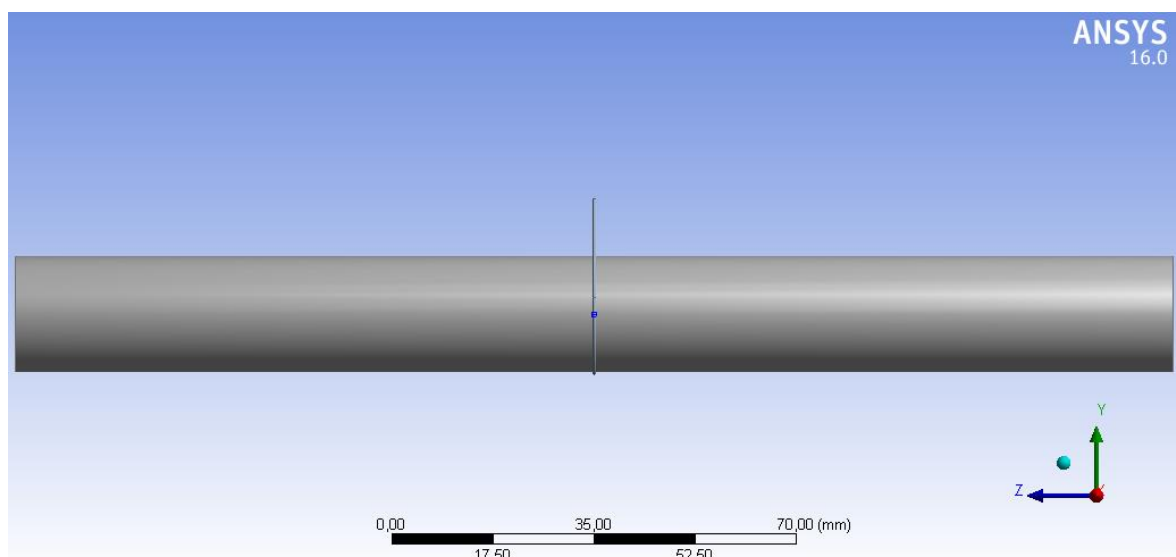


Figura 15 – Vista lateral esquerda do dispositivo

Os parâmetros de cota do desenho foram definidos conforme a Quadro 2:

Quadro 2 – Distâncias adotadas para o dimensionamento da peça.

Parameter Editor			
	Name	Value	Type
✓	diametro	20 mm	Length
✓	comprimento	200 mm	Length
✓	diametrofio	0,5 mm	Length
✓	distdetector	10 mm	Length
✓	presilha	10 mm	Length

Esses parâmetros foram associados às cotas destacadas conforme o quadro da Figura 16.

Parameter Editor			
	Target	Expression	Type
✓	XYPlane.D2	@diametro	Length
✓	Extrude1.FD1	@comprimento/2	Length
✓	XYPlane.D3	@diametro+@diametrofio	Length
✓	ZXPlane.D2	@diametrofio	Length
✓	ZXPlane.V4	@diametro/2+@diametrofio/2	Length
✓	XYPlane.H23	@presilha/2	Length
✓	XYPlane.V21	@diametro/2+@distdetector	Length

Figura 16 – Destaque das fórmulas que relacionam as cotas em seus respectivos planos de trabalho em cada *Sketch*.

As expressões no quadro da Figura 16 destacam as relações entre as cotas do desenho e os valores dos parâmetros considerados. Em algumas operações no desenho devem ser levadas em conta que as operações ocorrem de forma simétrica (em todas as direções), como por exemplo, a operação de extrusão da circunferência que dará origem ao cilindro.

As dimensões adotadas basearam-se nos tamanhos que possibilitassem a aquisição de peças de safira e fios para a suspensão, disponíveis no mercado.

3.2 AJUSTE DOS PARÂMETROS DOS MATERIAIS NA SIMULAÇÃO MECÂNICA

Para se realizar a simulação mecânica e elétrica, alguns dados foram reunidos, obtidos junto aos fabricantes dos materiais utilizados no protótipo virtual e também através do compêndio de estudos sobre as propriedades físico-químicas da safira (Al_2O_3), elaborados por Elena R. Dobrovinskaya, Leonid A. Lytvynov e Valerian Pishchik, onde realizaram um compêndio de informações no livro “*Sapphire - Material, Manufacturing, Applications, Springer, 2009*”. Nesse livro há um agrupamento valioso de informações sobre a safira, são destacadas características mecânicas, termomecânicas, elétricas e químicas, além das técnicas de fabricação da safira e a utilização dela nos diversos setores industriais, desde a joalheria, aplicações em engenharia, óptica, e medicina.

São reunidos no Quadro 3 os valores das propriedades da safira necessárias para a biblioteca de materiais do ANSYS®, visto que por padrão essas informações não vêm

disponibilizadas no software e devem ser inseridas pelo usuário. Esse compêndio de informações de dados técnicos é disponibilizado pelos fabricantes Rubicon Technology Inc. e Saint-Gobain Crystals em seus catálogos técnicos e sobre contato direto através de e-mails, sendo um lingote de safira com 200 mm de comprimento por 20 mm de largura, com alinhamento C-Plane (0001), eixo C alinhado com o eixo longitudinal do cilindro. Essas informações podem ser confrontadas por meio de literatura (DOBROVINSKAYA, LITVYNOV e PISHCHIK, 2009), há ainda especificações por meio de gráficos que ainda mostram o comportamento das propriedades em função da variação de parâmetros como a temperatura. Para a simulação realizada nesse trabalho todos os parâmetros de simulação são considerados sobre a hipótese de temperatura invariável a 4 K, dessa forma os parâmetros que variam em função da temperatura não serão consideradas suas variações e sim o seu valor constante nesse ponto de trabalho. Espera-se que com uma refrigeração em torno dessa temperatura os Q elétrico e mecânico dos materiais convergirão para os mais altos valores possíveis, além de diminuir o ruído térmico na estrutura.

Quadro 3 – Propriedades da Safira para a simulação mecânica (DOBROVINSKAYA, et al. , 2009)	
Densidade	3,97 g/cm ³
Young's Modulus	431,80 GPa
Shear Modulus	170,00 GPa
Poisson's Ratio	0,27
Tensile Yield Strength	15,50 GPa
Bulk Modulus	312,90 GPa
Tensile Ultimate Strength	1,90 GPa
Compressive Ultimate Strength	2,00 GPa

Para a análise de contato da suspensão com o detector necessita-se de um parâmetro mecânico, o coeficiente de atrito dinâmico entre a suspensão de Nióbio e o cilindro de Safira. Esse parâmetro é obtido através do ensaio disponibilizado em “*Wear Particles: From the Cradle to the Grave*, 1st Edition, Elsevier Science, Edited by D. Dowson, G. Dalmaz, T.H.C. Childs, C.M. Taylor, M. Godet ,1992”. Nesse livro um ensaio é realizado colocando em prova uma peça de safira esférica e outra cilíndrica sob fricção em outra peça de Nióbio, são mencionados os parâmetros de ensaio que incluem deslocamentos com velocidade de 24 mm/s, carga normal à superfície de 5 N, humidade relativa entre 40% e 60% e 1000 ciclos de ensaio no tribômetro. Nesse ensaio tomaram-se os cuidados necessários para não haver deformação plástica na superfície de contato. O gráfico presente na Figura 17 apresenta o resultado da média dos valores obtidos do coeficiente de fricção do ensaio. Pode-se observar

que o valor médio do coeficiente de atrito dinâmico na peça de safira (Al_2O_3) em contato com o nióbio (Nb) encontra-se na ordem de 0,36 depois de aproximadamente 200 ciclos do ensaio, será adotado esse valor como coeficiente de atrito dinâmico entre o cilindro de safira e sua suspensão de nióbio.

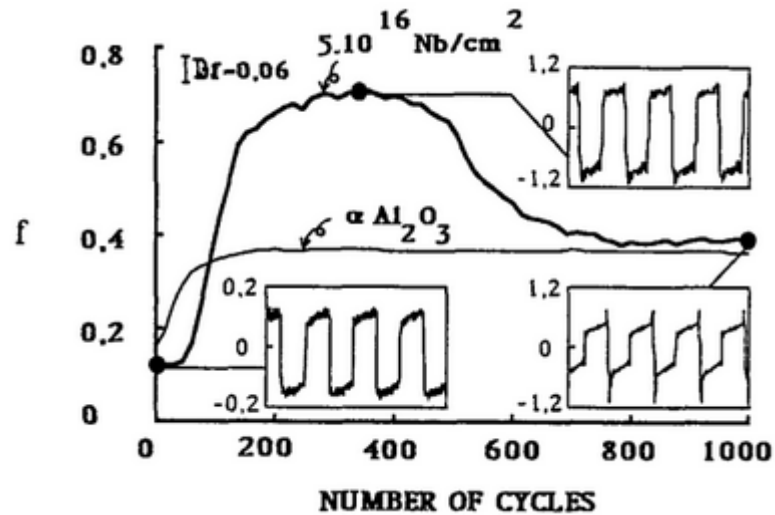


Figura 17 – Essa figura apresenta os valores médios para ensaios de tribologia realizados entre a safira e o nióbio com o objetivo de se determinar o coeficiente de fricção. É apresentada a evolução do coeficiente de fricção em relação ao número de ciclos de realização do ensaio. As peças são friccionadas umas às outras com movimentos aleatórios sem que haja deformação na superfície do material. Fonte: (DOWSON, DALMAZ, *et al.*, 1992)

Para simular a dependência da temperatura, o coeficiente de expansão térmica foi extraído da literatura (DOBROVINSKAYA, LYTVYNOV e PISHCHIK, 2009). A simulação realizada irá tratar a safira em condições de refrigeração a 4 K. Nessa faixa de temperatura a safira não apresenta deformação significativa e seu coeficiente de expansão (α) obtido da extrapolação do gráfico da Figura 18 encontra-se próximo dos $0,9 \times 10^{-8} K^{-1}$.

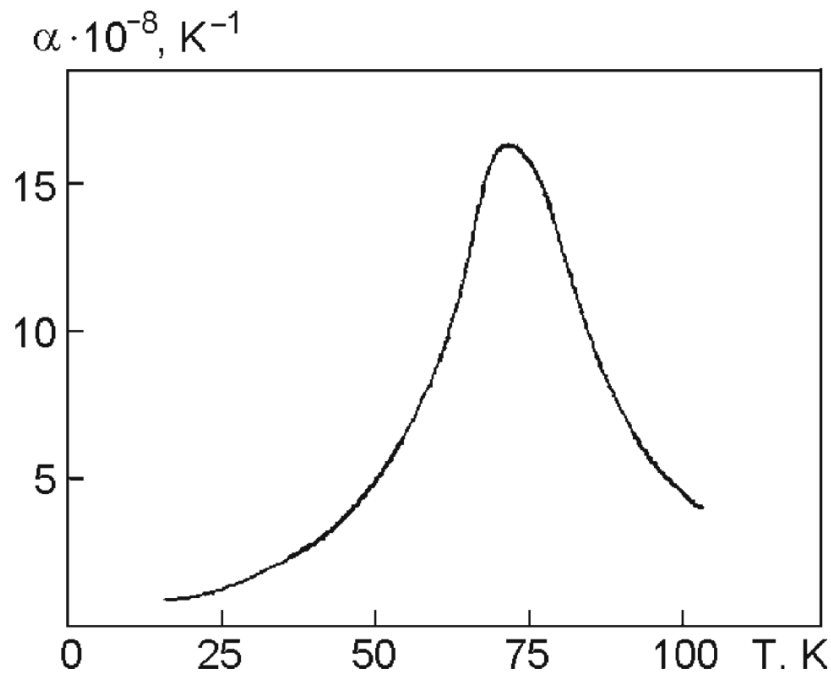


Figura 18 – Comportamento do coeficiente de expansão térmica (Thermal Expansion Coefficient) em função da temperatura na Safira (Al_2O_3). Fonte: (DOBROVINSKAYA, LYTVYNOV e PISHCHIK, 2009).

Ainda para se realizar a dependência da temperatura durante a simulação, adotou-se o coeficiente de condutividade térmica apresentado no gráfico da Figura 19.

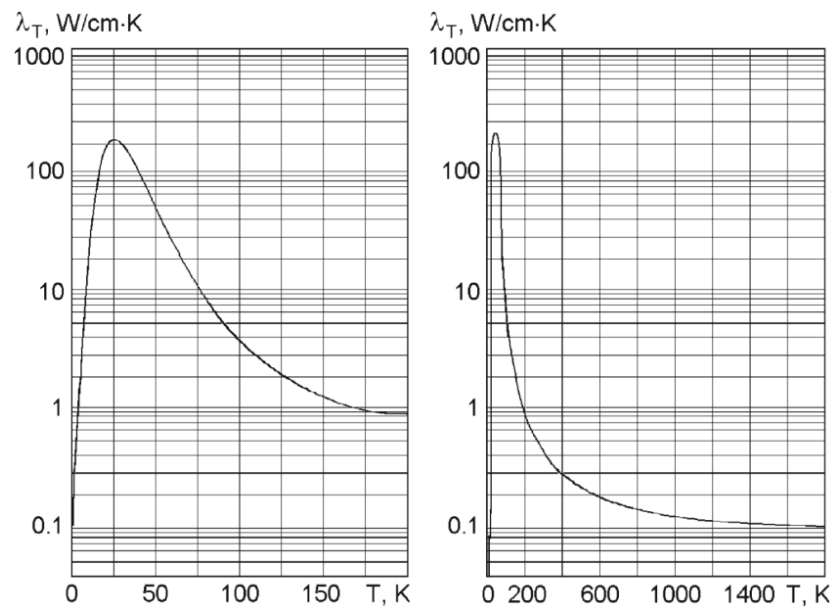


Figura 19 – Coeficiente de condutividade térmica e sua dependência da temperatura, gráfico para baixas temperaturas e altas temperaturas. Fonte: (DOBROVINSKAYA, LYTVYNOV e PISHCHIK, 2009).

Todas as características técnicas que são apresentadas na forma de gráficos são digitadas em forma tabular no recurso *Material Library* do ANSYS®, a ferramenta

computacional se encarrega de realizar a interpolação entre os pontos intermediários das tabelas para geração dos gráficos.

As propriedades físicas do Nióbio já estão disponibilizadas no recurso *Material Library* do ANSYS®, as informações disponibilizadas nesse recurso encontram-se na literatura (STEINBERG, 1996).

3.3 SIMULAÇÃO ESTÁTICA ESTRUTURAL

A SEE (Simulação Estática Estrutural) visa avaliar se as tensões ou a fricção entre o detector e a suspensão causam deformações plásticas que comprometerão a superfície do detector ou a ruptura da suspensão devido ao peso do detector.

Para se realizar essa simulação é necessário estabelecer os valores e configurações de alguns parâmetros no ANSYS®. Esses parâmetros permitirão a aproximação do modelo matemático da planta através da aplicação do MEF.

3.3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Nos corpos que fazem parte do modelo atribui-se a safira ao detector e o nióbio à suspensão, isso é feito selecionando-se o modelo sólido e na definição de suas propriedades atribui-se o material correspondente. A Figura 20 retrata a atribuição do material safira ao sólido do detector e a Figura 21 retrata a atribuição do material nióbio à suspensão.

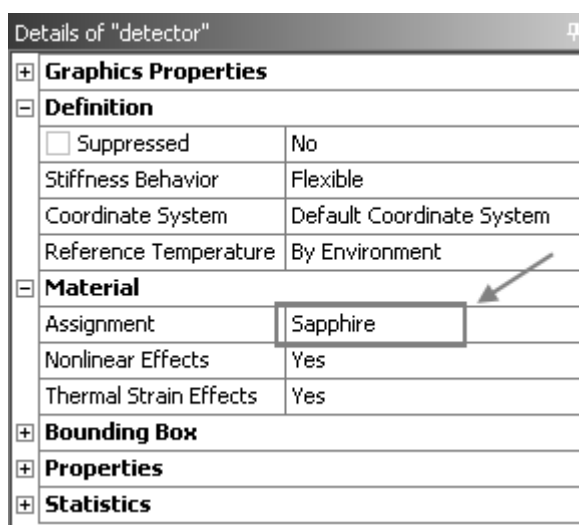


Figura 20 - Atribuição da safira ao cilindro do detector, essa informação fica disponível no “*Material Library*”.

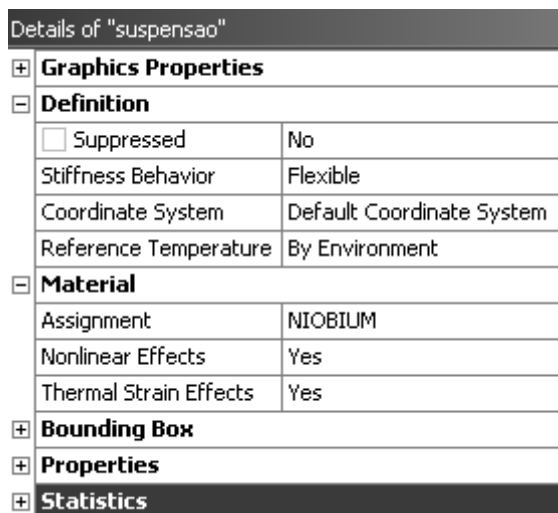


Figura 21 - Atribuição do nióbio à suspensão do detector.

3.3.2 DISCRETIZAÇÃO (MALHA)

A discretização na região em torno da área de fricção deve conter um número maior de elementos finitos para se descrever melhor o comportamento de contato entre os sólidos e nas outras regiões uma distribuição uniforme dos elementos é o suficiente para a aplicação do MEF e para se descobrir o comportamento da estrutura, e isso é facilitado graças à simetria do modelo e o tipo de carga mecânica utilizada na análise.

As regiões de contato são definidas com elementos finitos específicos os quais recebem como parâmetro o coeficiente de fricção entre os materiais envolvidos.

Na Figura 22 pode-se observar a região da suspensão que está em contato com o cilindro de safira. A operação *Imprint Faces* realizada durante a modelagem 3D do sólido marca essa região com uma aresta que pode ser selecionada para ajuste de parâmetros.

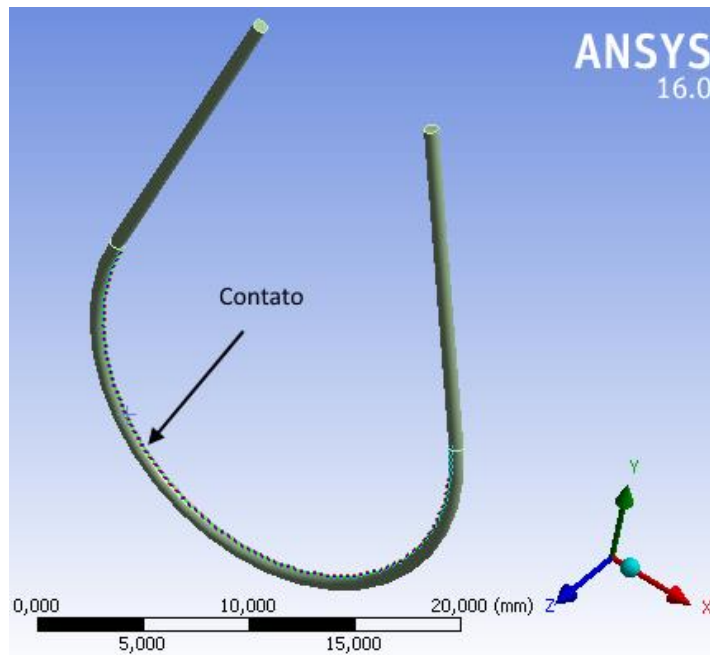


Figura 22 – *Imprint Face* na região de contato da suspensão.

A Figura 23 exibe a seleção da região de contato do cilindro dada pela operação *Imprint Faces*, essa operação gera uma linha sobre a face da peça de safira, essa linha é considerada uma aresta (*Edge*), e ela é selecionada como parâmetro para o refinamento do tipo *Edge Sizing* para produzir uma malha refinada nessa região.

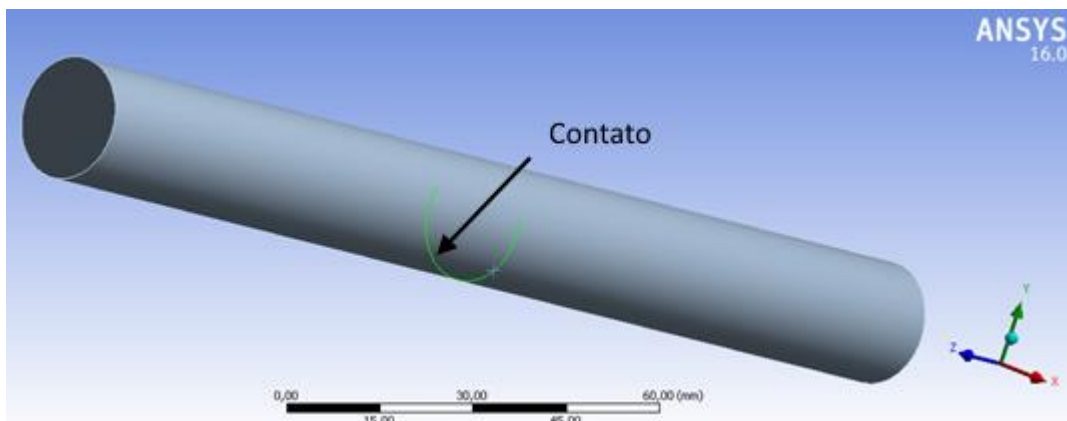


Figura 23 - Contorno de contato obtido através de “*Imprint Faces*”.

Para ajustar o refinamento da malha nessa aresta foi selecionada e definido o tamanho das arestas dos elementos em contato com ela como sendo de 1 mm (o software se encarrega de atribuir essas dimensões e o tipo de elemento mais apropriado ao contato com a aresta), esse valor foi obtido empiricamente, avaliando-se o contato através da ferramenta *Contact Tool* que permite avaliar o comportamento do contato entre os sólidos, a cada avaliação um

ajuste no tamanho da aresta do elemento (*Element Size*) era realizado. A Figura 24 exibe o resultado final de várias tentativas de contato manipulando-se os parâmetros da discretização. A cor amarela significa que houve contato entre as peças.

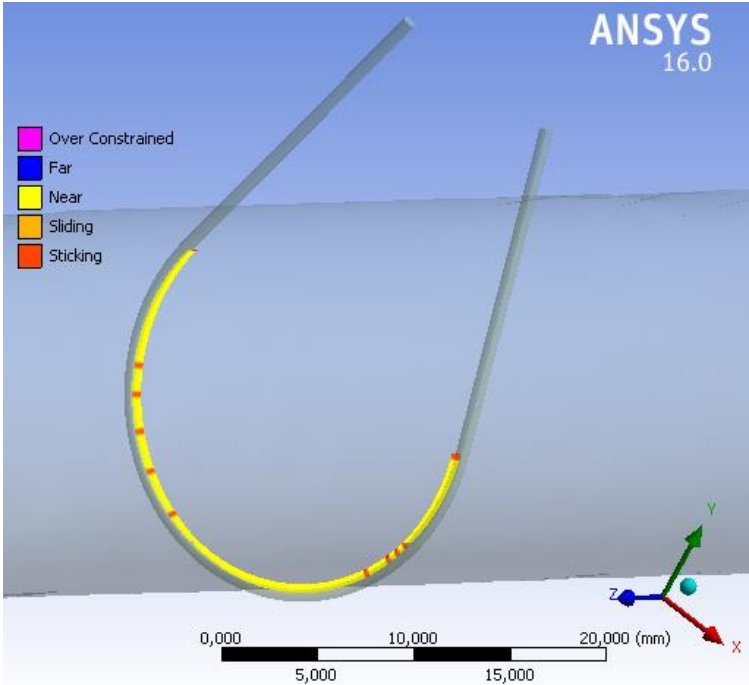


Figura 24 - Após a realização dos ajustes do refinamento, o contato (região em amarelo) se estendeu por todo o arco de contato, as regiões vermelhas são interpretadas como pequenas interferências.

E por fim a Figura 25 exibe o quadro de configurações da malha configurada para obter-se o resultado de contato da Figura 24. Percebe-se o ajuste de tamanho dos elementos (*Element Size*) de 1 mm, e transições suaves (*Smooth Transitions*) a medida que se distancia da região de contato.

Details of "Edge Sizing" - Sizing	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Edge
Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	1, mm
Behavior	Hard
Bias Type	- _ _ _ _ _ -
Bias Option	Smooth Transition
Bias Growth Rate	1,2

Figura 25 - Configurações da malha da região de contato.

A Figura 26 exibe a região que recebeu o refinamento apresentado no quadro da Figura 25.

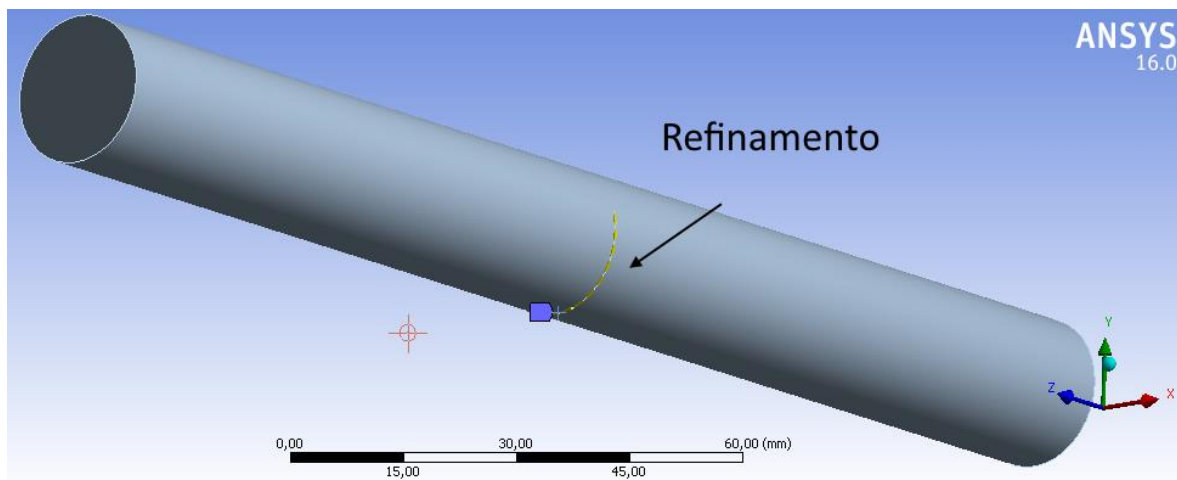


Figura 26 – Seleção do contorno de refinamento nas configurações do parâmetro *Edge Sizing* da malha na região de contato.

A malha foi ajustada até que o software pudesse perceber a restrição nos movimentos do cilindro sobre a suspensão. Os parâmetros foram ajustados a cada simulação até que os valores de ajuste apropriados fizessem com que a peça mantivesse retida na suspensão, neste ponto é como se o software percebesse que há contato entre as partes e esse contato restringe os movimentos da peça.

A escolha de um refinamento grosseiro da malha impossibilita o MEF determinar uma região de contato suficiente para reter o cilindro sobre a suspensão e isso faz com que a peça caia livremente como se não houvesse algum tipo de retenção quando recebe a aceleração gravitacional para simular-se o peso da massa dos corpos e se calcular os esforços mecânicos devidos ao peso dos elementos.

As faces axiais do cilindro também recebem refinamento para que as deformações durante a simulação modal e harmônica possam ser calculadas com maior precisão.

O quadro da Figura 27 exibe as configurações adotadas no refinamento aplicado à malha da região das faces axiais do cilindro, percebe-se o ajuste do parâmetro *Element Size* com o valor de 5 mm.

Details of "Face Sizing" - Sizing	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	2 Faces
Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
Element Size	5, mm
Behavior	Soft
Curvature Normal Angle	Default
Growth Rate	Default
Local Min Size	Default (1,e-003 mm)

Figura 27 - Configurações de refinamento da malha nas faces axiais do cilindro.

Na Figura 28 é possível observar as faces axiais selecionadas para a aplicação do refinamento.

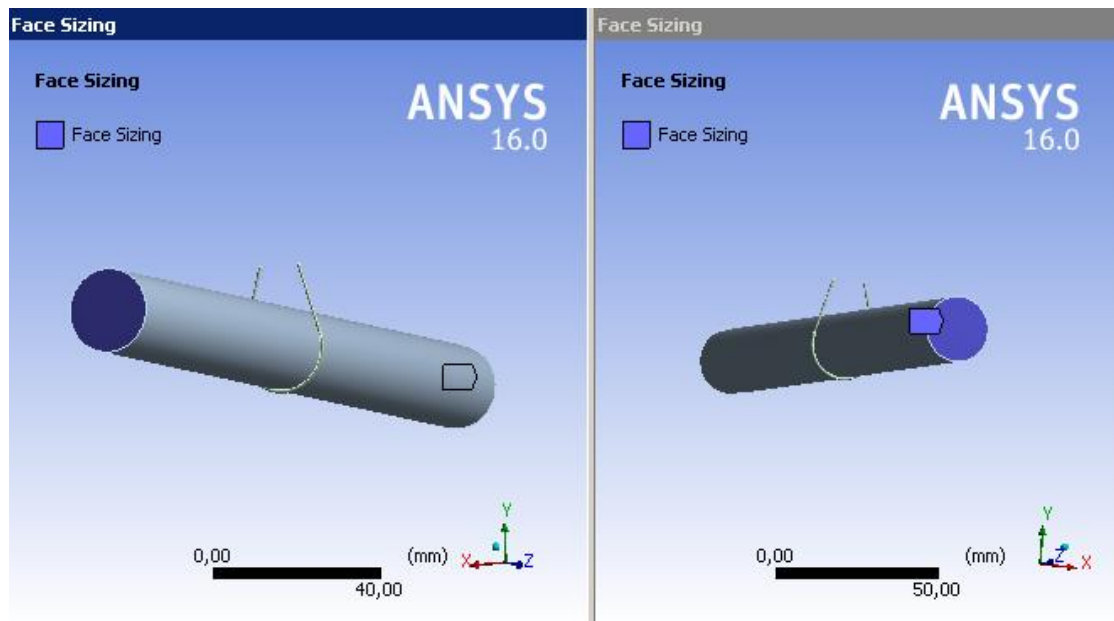


Figura 28 - Áreas das faces axiais selecionadas para o refinamento da malha.

As configurações gerais de malha são aplicadas a todos os elementos, e definiu-se o tamanho da aresta do menor elemento finito possível como sendo $1 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$, o tamanho dos elementos sofrem transições para que o resultado final componha o sólido total, de maneira que o conjunto formado por cada elemento dá o formato final da peça. Os elementos das faces axiais do cilindro possuem arestas de 5 mm e gradativamente são distribuídos elementos até a zona de contato, onde o refinamento maior pode ser observado. A Figura 29 exhibe o resultado final da malha após o processo de refinamento.

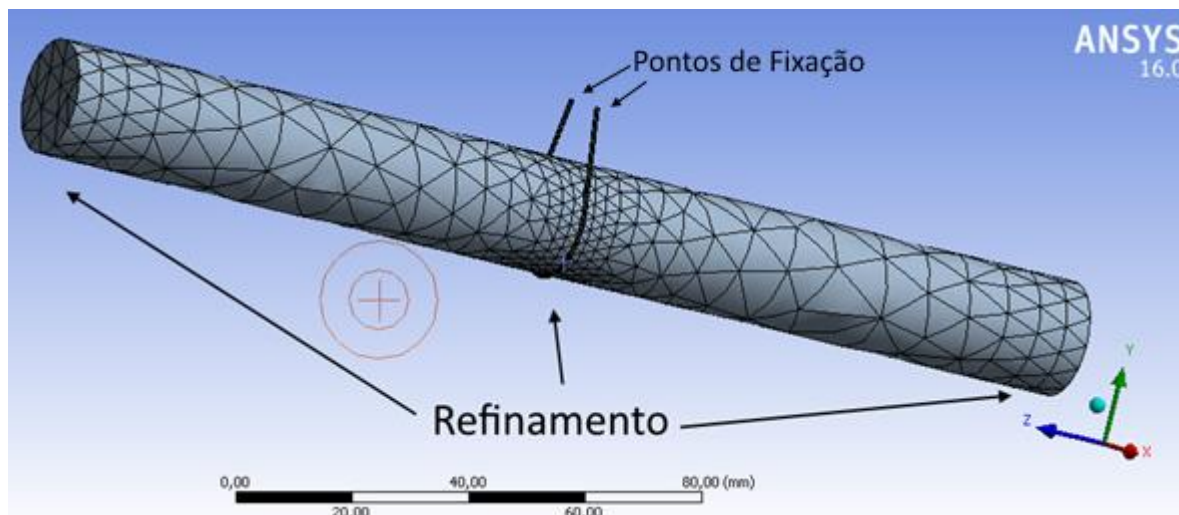

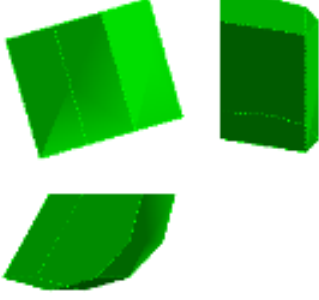


Figura 29 – Malha finalizada após o refinamento da face e da zona de contato.

O resultado final apresentado na Figura 29 resumidamente apresenta as características apresentadas na Quadro 4:

Quadro 4 - Resumo da finalização da malha		
Características	Detector (cilindro de safira)	Suspensão (fio de nióbio)
Número de nós	16373	3880
Número de Elementos	10990	504
Tipos de elementos adotados	Tetraedro	Hexaedro
		

3.3.3 PARAMETRIZAÇÃO DO CONTATO

O contato ocorre entre os elementos finitos de linha obtidos através de uma operação denominada *Imprint Faces* realizada durante a construção da geometria de toda a estrutura, essa operação coloca sobre cada face de contato dos sólidos (detector e suspensão) uma linha que marca o ponto de contato tangente, essa linha é considerada uma aresta. Essas arestas podem ser selecionadas como parâmetros para a configuração do contato. A configuração do contato deve ser realizada em conjunto com a configuração da malha.

O ANSYS® fornece configurações de contato automáticas, mas para esse caso, onde o tipo de contato é tangencial, em torno de duas arestas e há atrito entre as faces, adotamos a configuração manual que permite estabelecer os parâmetros de contato de fricção. O ANSYS® possui vários tipos de configuração de contato, desde o tipo *Bonded* que considera que as peças envolvidas estão sempre unidas e não ocorre nenhum tipo de deslocamento relativo, até o tipo de configuração *Frictionless* que permite a atribuição de coeficiente de fricção nulo entre as zonas de contato, desse modo as peças podem deslizar livremente mesmo com uma força normal à superfície de contato.

O contato *Frictional* oferecido pelo software permite estabelecer o coeficiente de fricção entre a suspensão de nióbio e o detector de safira. Esse coeficiente pode ser obtido através do ensaio encontrado na Seção 3.2 Ajuste dos parâmetros dos materiais na simulação mecânica. O coeficiente de atrito apresentado nessa seção, de acordo com o dado obtido da Figura 17 está em torno de 0,36. As arestas na face do cilindro e na suspensão são selecionadas como parâmetros para a configuração de contato. A aresta na face do cilindro será o elemento *Target* e a aresta na face da suspensão que está em contato com o cilindro será o elemento *Contact*. A Figura 30 exibe a configuração que foi adotada nos elementos que farão o contato entre as peças.

Details of "Frictional - suspensao To detector"	
☐ Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	1 Edge
Target	1 Edge
Contact Bodies	suspensao
Target Bodies	detector
☐ Definition	
Type	Frictional
<input type="checkbox"/> Friction Coefficient	0,36

Figura 30 - Configuração de Contato.

A Figura 31 exibe pequenas lacunas de contato dadas pelas imperfeições entre os elementos finitos da face do cilindro e da face do fio da suspensão, essas lacunas são marcadas pela cor azul. Essa informação é obtida através da ferramenta *Contact Tool*.

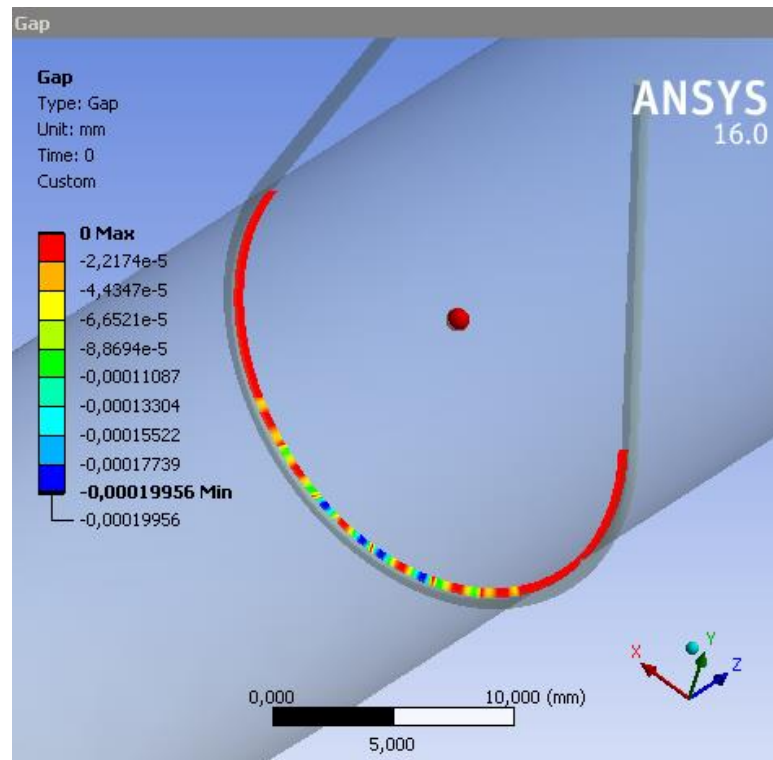


Figura 31 - Pequenas fissuras de contato entre as peças.

A Figura 32 exibe as penetrações dos elementos finitos entre as faces de contato dos sólidos. Essas imperfeições acarretam incertezas nos cálculos do projeto, mas não trazem uma contribuição significativa no erro, visto que por se tratar de uma superfície cilíndrica quando a carga peso agir durante a simulação, ocorrerá a acomodação da peça sobre a superfície do fio, isso reduz os erros na computação dos dados, devido à simetria do problema.

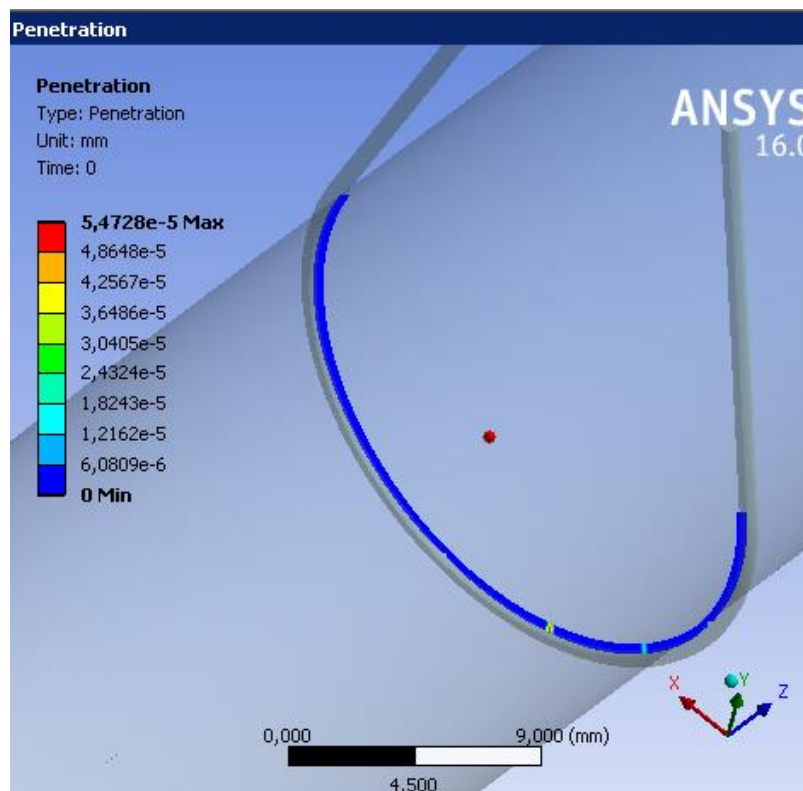


Figura 32 - Penetração dos elementos de contato entre as peças.

A Figura 24 exibe o resultado final do contato obtido entre os sólidos do projeto, a cor em amarelo permite distinguir as zonas de contato dos pontos que não estão em contato.

3.3.4 SUPORTES DE FIXAÇÃO (*FIXED SUPORTS*)

A estrutura será fixada em dois pontos de fixação que se encontram nas faces das extremidades da suspensão, e podem ser observados na Figura 33, esses pontos restringirão os deslocamentos do conjunto. A própria suspensão, após o ajuste do contato limitará os graus de liberdade do detector, isso gera restrições em algumas direções.

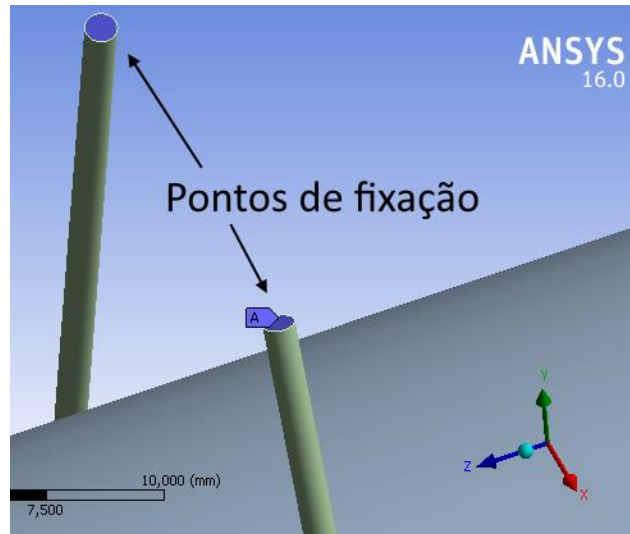


Figura 33 - Detalhamento dos pontos de fixação da suspensão.

3.3.5 CARGAS MECÂNICAS (*LOADS*)

As cargas mecânicas que serão aplicadas nessa simulação são: a aceleração gravitacional (dada pela constante de aceleração gravitacional, $g = 9806,6 \text{ mm/s}^2$) normal ao eixo do cilindro e que será aplicada a toda a estrutura de maneira a verificar se a suspensão suporta o peso do detector e de sua própria massa; e a variação de temperatura para avaliar o comportamento da peça sobre uma transição de temperatura ambiente à temperatura criogênica na faixa dos 4 K.

Para configurar a aceleração gravitacional orientou-se o vetor aceleração gravitacional $\vec{g} = 9806,6\hat{j} \text{ m}^2$ de acordo com os eixos do cilindro tal qual a Figura 34:

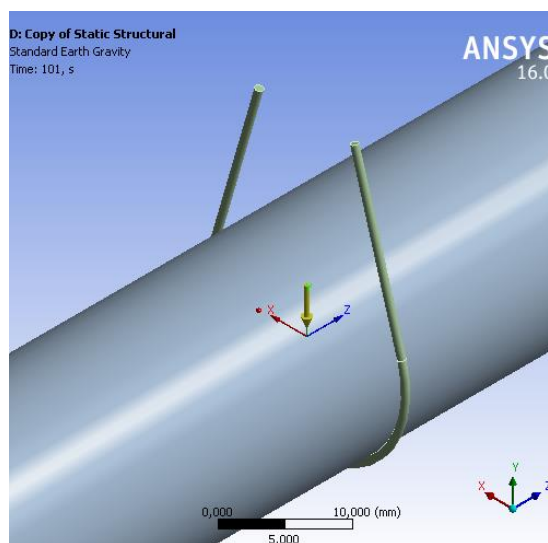


Figura 34 - Em amarelo no centro o vetor aceleração gravitacional (\vec{g}).

Para se configurar a carga térmica selecionou-se toda a estrutura e definiu-se o degrau de temperatura aplicado a toda estrutura (suspensão e detector).

3.3.6 CONFIGURAÇÃO DOS DEGRAUS (STEPS)

Três degraus serão configurados dando um tempo total de 101 s de simulação. As cargas serão aplicadas em etapas.

O gráfico da Figura 35 apresenta os passos de aplicação da aceleração gravitacional (g). A aceleração gravitacional é aplicada em rampa até atingir o seu valor máximo, isso é realizado no primeiro passo, depois que se atinge a aceleração máxima ela é mantida com seu valor constante no próximo passo.

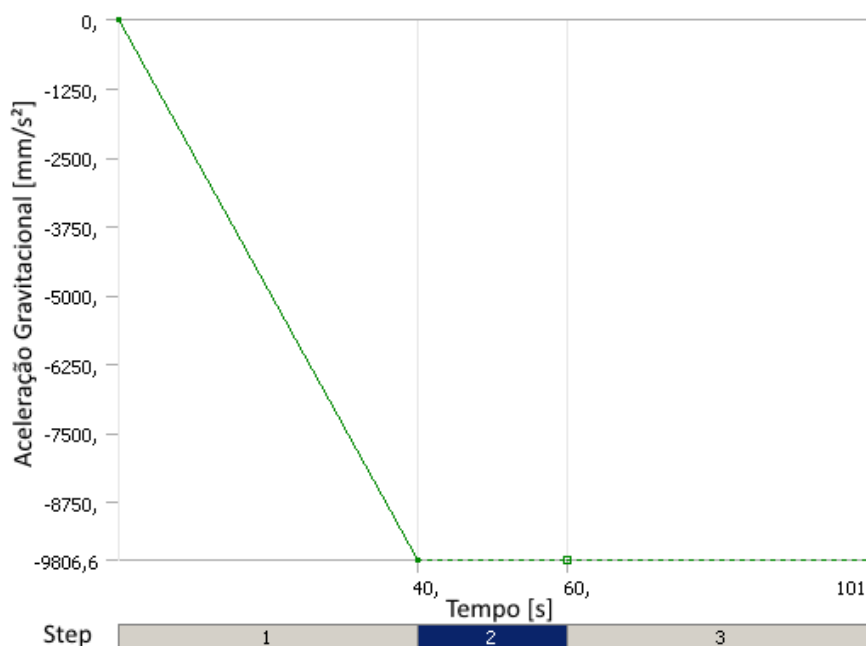


Figura 35 - Gráfico que apresenta as etapas de aplicação da aceleração gravitacional.

O primeiro passo tem duração de 40 s. Nele ainda não se aplicou a carga térmica. A carga térmica será aplicada apenas no terceiro passo. Optou-se por deixar um passo de 20 s entre a aplicação da aceleração gravitacional e a carga térmica para melhor análise dos dados, dessa forma é possível avaliar a influência das cargas. A carga térmica é aplicada em degrau no último passo durante um intervalo de 41 s, esse degrau é apresentado no gráfico da Figura 36.

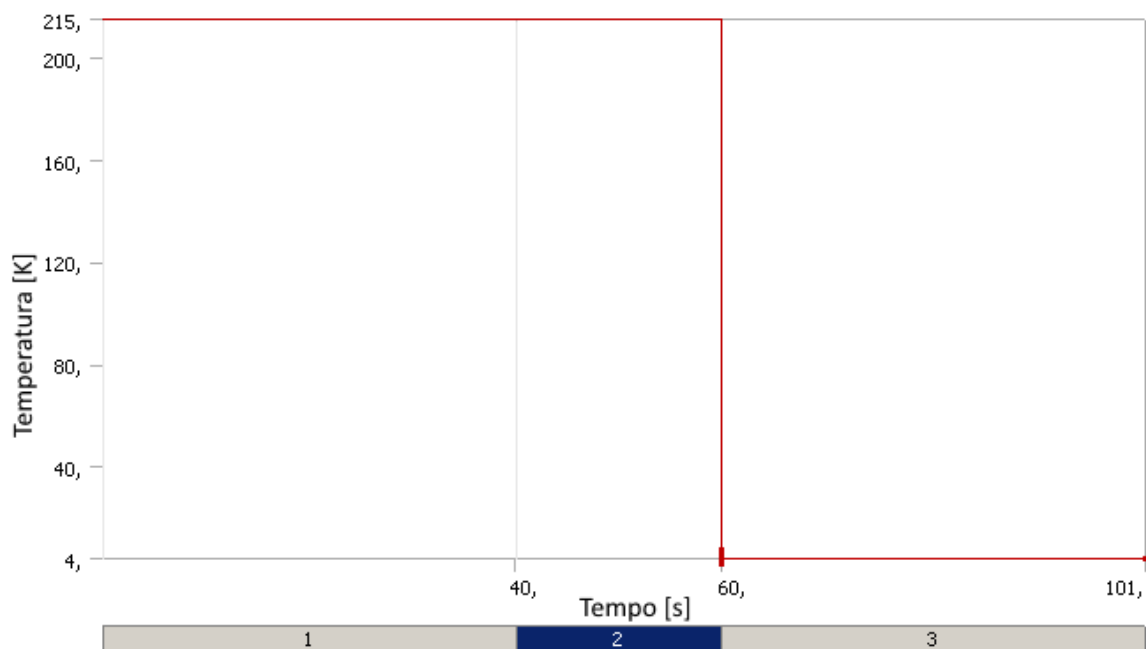


Figura 36 - Gráfico que apresenta a etapa de aplicação do degrau térmico de 4 K.

3.3.7 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO ESTÁTICA ESTRUTURAL

Os resultados da simulação estática visam analisar se a suspensão é forte o suficiente para suportar o peso da peça de safira e se a peça de safira suporta a fricção do fio de nióbio sob sua superfície, esses resultados são obtidos através das ferramentas de solução do ANSYS® e são apresentados na forma de gráficos e de gradientes de cores sobre o sólido, ou mediante a apresentação de vetores que indicam o sentido das deformações ou dos esforços.

A primeira solução obtida é sobre a deformação do fio da suspensão. A Figura 37 apresenta a direção e o sentido das deformações no corpo da suspensão. Essa informação é apresentada por meio de vetores. A visualização dos vetores expõe o deslocamento esperado quando a peça de safira é posta sobre o fio da suspensão de nióbio. Os vetores indicam a tendência dos deslocamentos causados pelo peso da peça de safira.

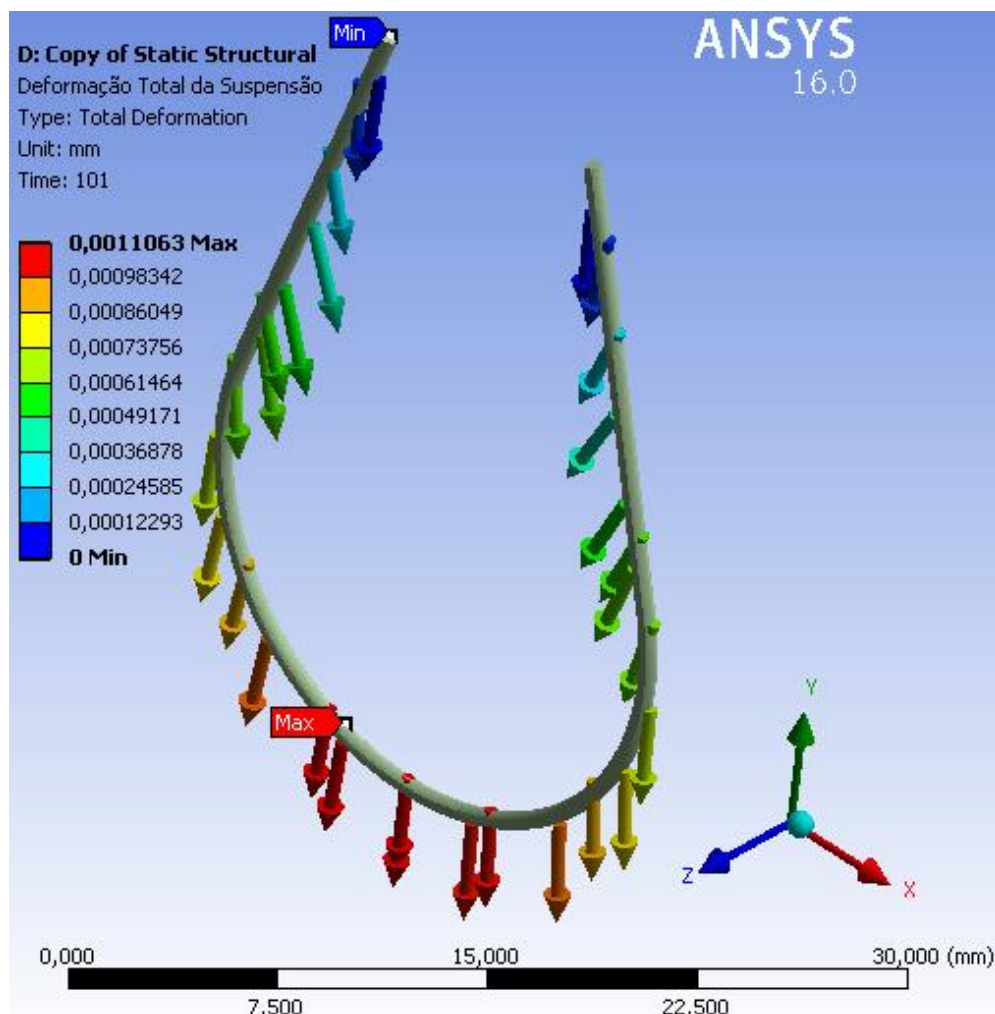


Figura 37 - Resultado após a simulação da deformação total.

A Figura 38 exibe o gradiente de cores que marca os locais que sofreram deslocamentos. As cores mais quentes indicam maiores deslocamentos, o ponto de fixação não sofre alterações na deformação, mas a região em contato com a safira sofre a distensão causada pelo peso da peça de safira. Essa visualização dá a ideia da posição de um provável rompimento do fio da suspensão, caso ele não suporte o peso do detector, ao atingir o limite de escoamento do material do fio.

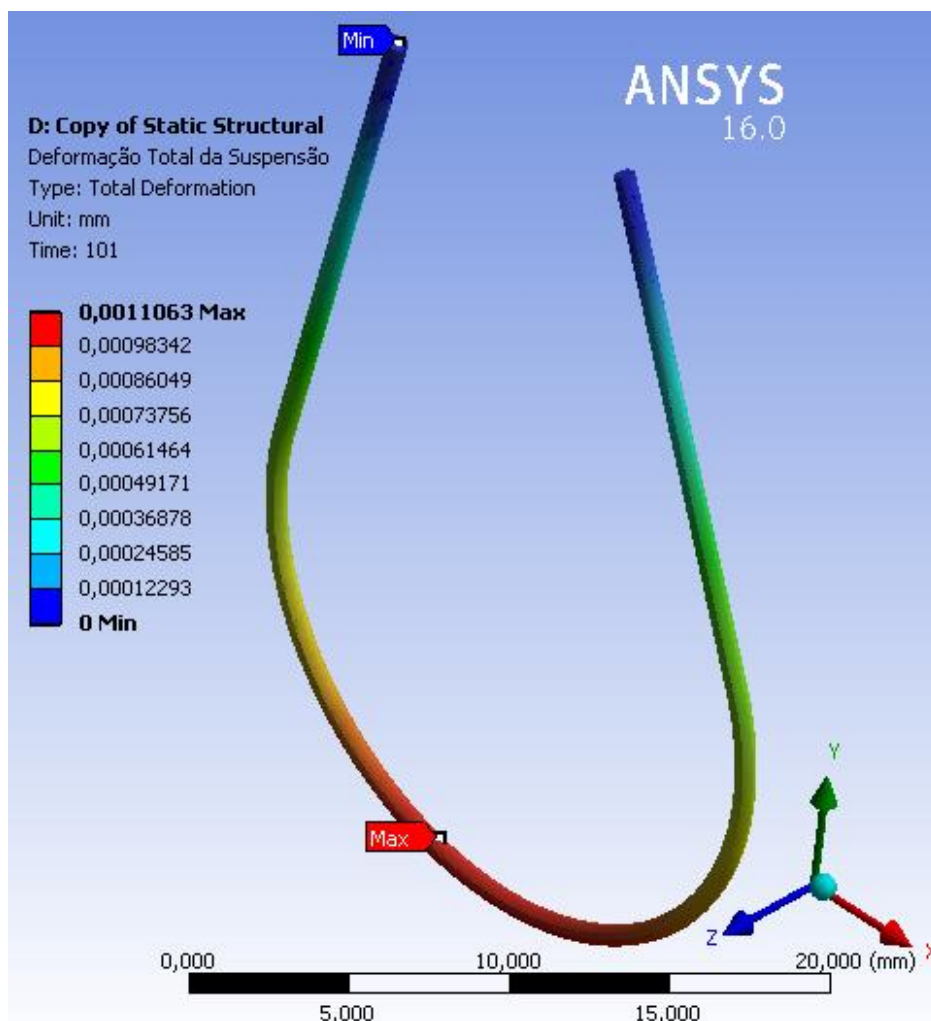


Figura 38 - Gradiente de cores que indicam o local de maior deformação no fio da suspensão.

Na Figura 39 é apresentado um gráfico da evolução das deformações máximas na suspensão. Durante o intervalo entre 0 s e 40 s, que corresponde ao primeiro passo da simulação, há uma evolução na deformação da suspensão até que se mantém estável durante o segundo e terceiro passos.

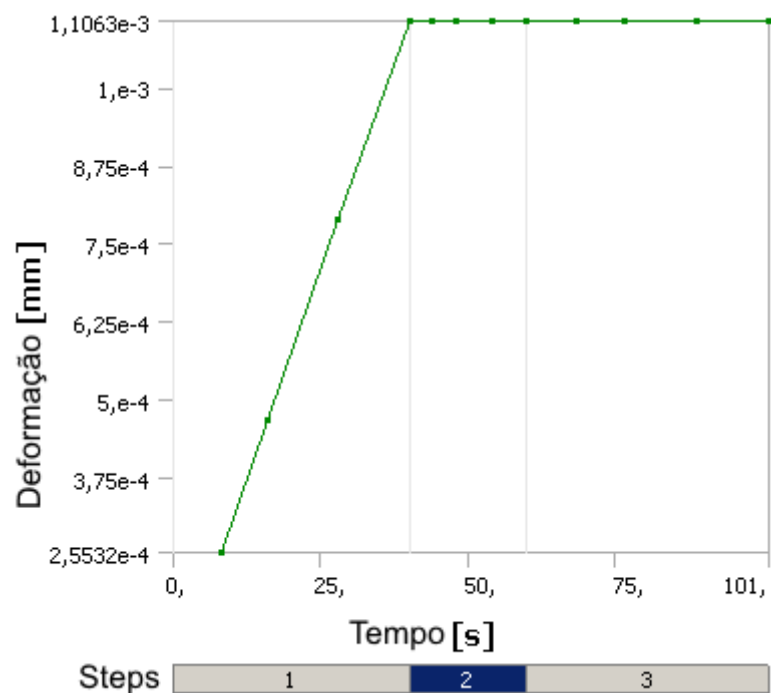


Figura 39 - Gráfico da evolução das deformações máximas na suspensão.

No terceiro passo a carga térmica é ativada, mas sua contribuição não é significativa no resultado da deformação da suspensão. O Quadro 5 apresenta a evolução da deformação máxima do fio da suspensão no tempo. As deformações causadas pela contração térmica não apresentam valores significativos e isso pode ser observado no intervalo entre 68,2 s e 101 s, os valores da deformação máxima não sofrem alterações.

Quadro 5 - Evolução da Deformação Máxima da suspensão no tempo.		
Step	Tempo [s]	Deformação Máxima [mm]
1	8	0,000255320
	16	0,000468520
	28	0,000787830
	40	0,001106200
2	44	0,001106200
	48	0,001106300
	54	0,001106300
	60	0,001106300
3	68,2	0,001106300
	76,4	0,001106300
	88,7	0,001106300
	101	0,001106300

Como a deformação é pequena para ser apresentada através de uma imagem, há a necessidade de se ampliar a escala da deformação para que se possa analisá-la, e isso é possível graças a um recurso de ampliação visual da escala de deformação, esse recurso que o ANSYS® oferece permite que mesmo que a deformação seja imperceptível a olho nu, pode-se analisar seu formato e verificar se a deformação ocorre mediante os resultados esperados. A deformação apresentada na suspensão, em escala ampliada pode ser visualizada na Figura 40.

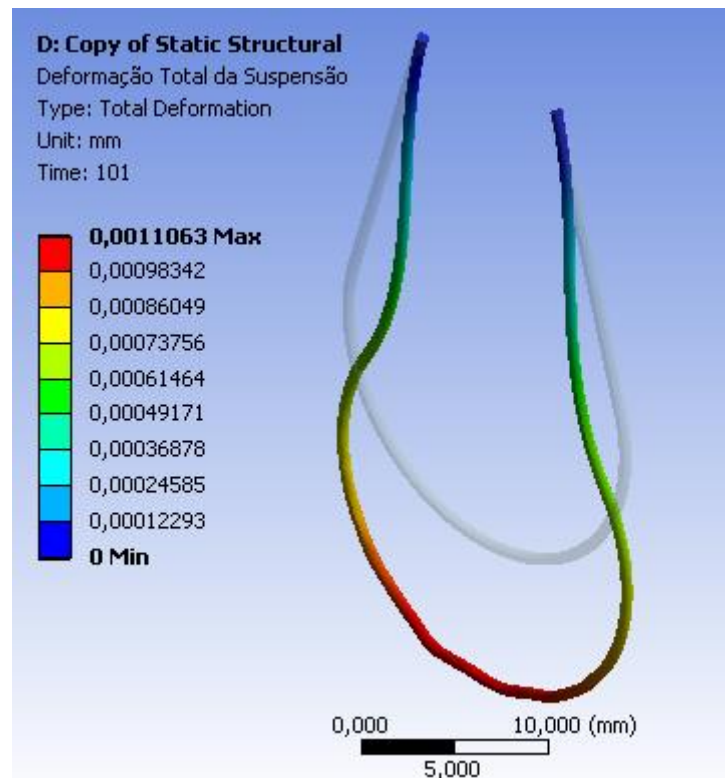


Figura 40 - Deformação em uma escala 5:1.

A evolução no tempo das deformações da suspensão pode ser visualizada na Figura 41, nela pode-se perceber a distensão sofrida pelo fio da suspensão devido ao peso do cilindro, o formato circular marca a posição do cilindro.

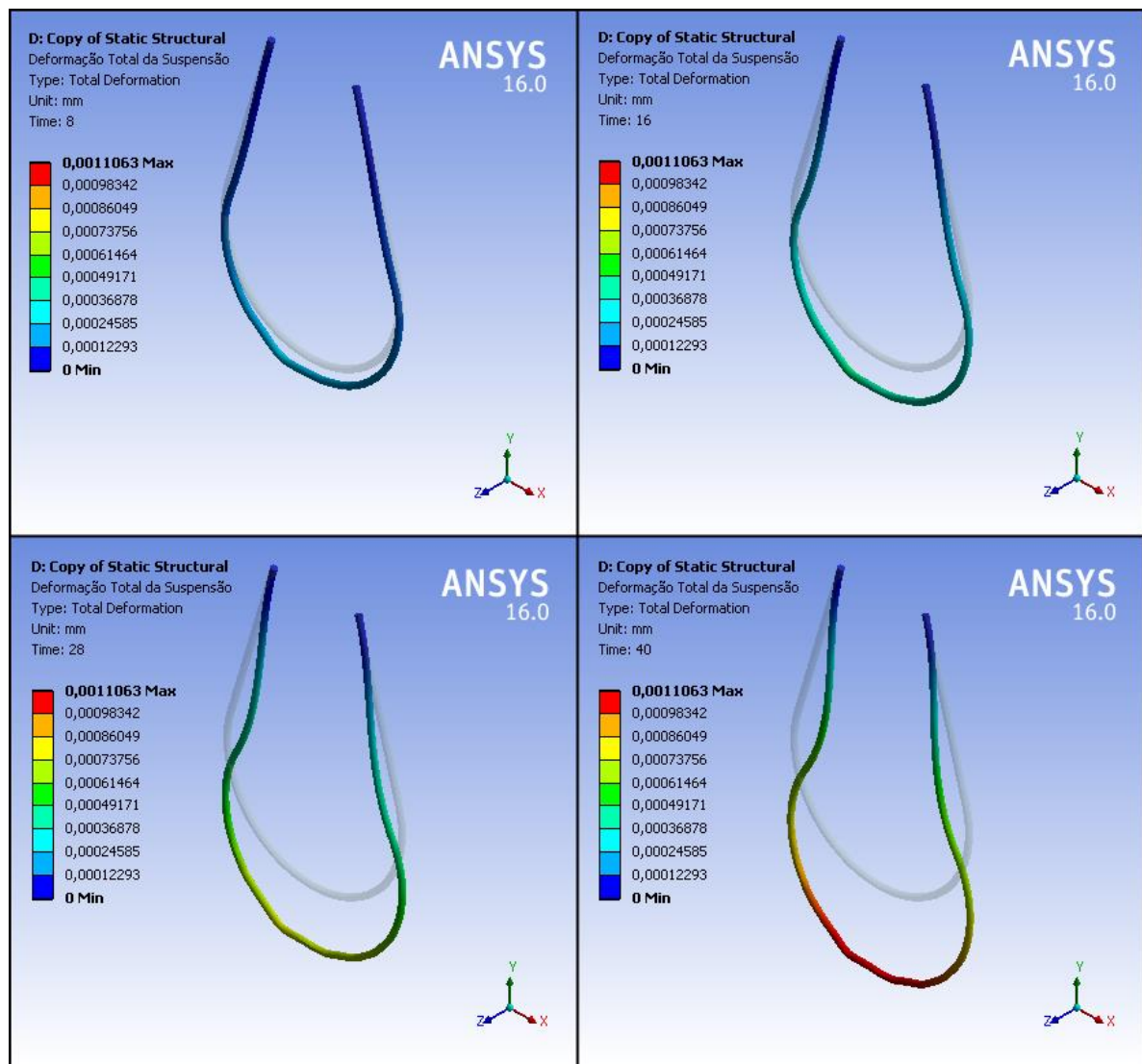


Figura 41 - Evolução da deformação da suspensão no tempo em escala ampliada. Na sequência da esquerda para a direita, de cima para baixo os instantes 8 s, 16 s, 28 s e 40 s.

Pode-se extrair a energia absorvida pela suspensão durante o processo de deformação, a sequência de imagens da Figura 42 mostra a evolução da absorção de energia no tempo.

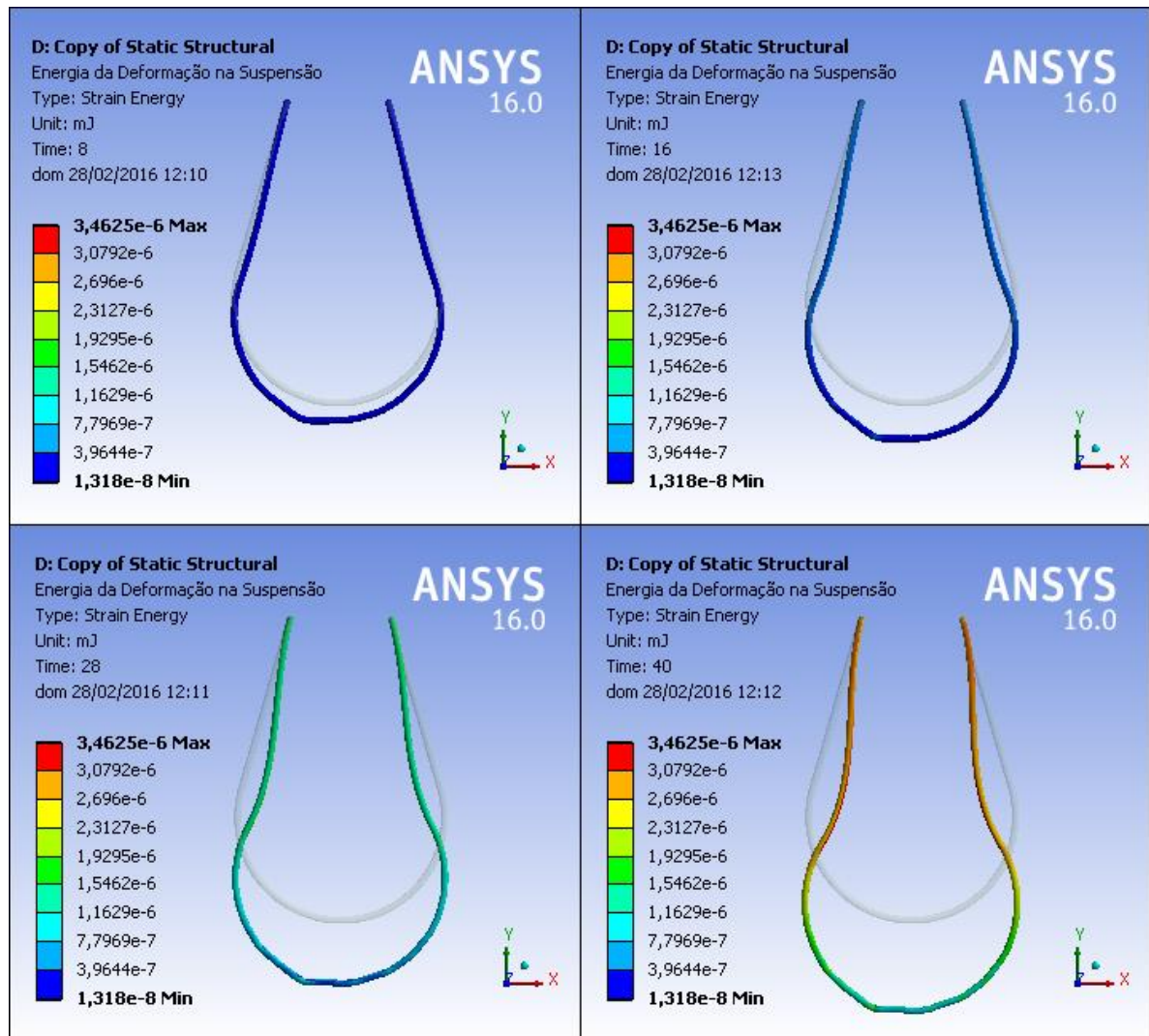


Figura 42 - Evolução da absorção de energia pela suspensão. Na sequência da esquerda para a direita, de cima para baixo os instantes 8 s, 16 s, 28 s e 40 s

Essa evolução pode ser observada através do gráfico apresentado na Figura 42, nele é possível avaliar que toda a suspensão absorve energia, isso porque o gráfico exibe os valores de energia máximos e mínimos absorvidos e sua evolução no tempo.

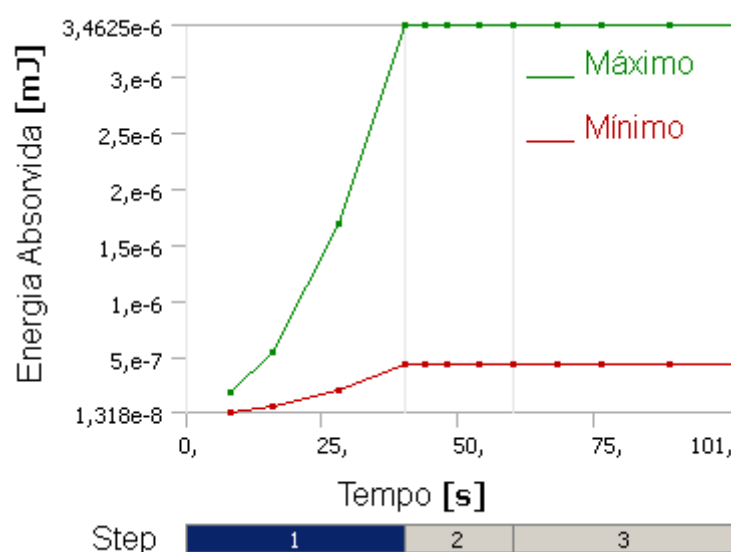


Figura 43 - Evolução da absorção de energia nos pontos de absorção máxima e mínima.

O Quadro 6 exhibe resumidamente as informações apresentadas pelo gráfico da Figura 43. Pode-se observar que após o segundo passo, como não ocorrem mais deformações, a energia absorvida se mantém estável nos pontos de maior absorção e menor absorção de energia. A Figura 44 destaca os pontos onde ocorrem a maior e a menor absorção de energia, esses pontos estão marcados com “*Max*” e “*Min*”.

Quadro 6 - Evolução da Absorção de Energia nos pontos de Máxima e Mínima absorção.			
Step	Tempo [s]	Mínima Energia [mJ]	Máxima Energia [mJ]
1	8	0,0000000131800	0,0000001843400
	16	0,0000000666490	0,0000005521300
	28	0,0000002016000	0,0000016954000
	40	0,0000004467300	0,0000034624000
2	44	0,0000004467300	0,0000034624000
	48	0,0000004477300	0,0000034625000
	54	0,0000004478000	0,0000034625000
	60	0,0000004477800	0,0000034625000
3	68,2	0,0000004477900	0,0000034625000
	76,4	0,0000004477900	0,0000034625000
	88,7	0,0000004477900	0,0000034625000
	101	0,0000004477900	0,0000034625000

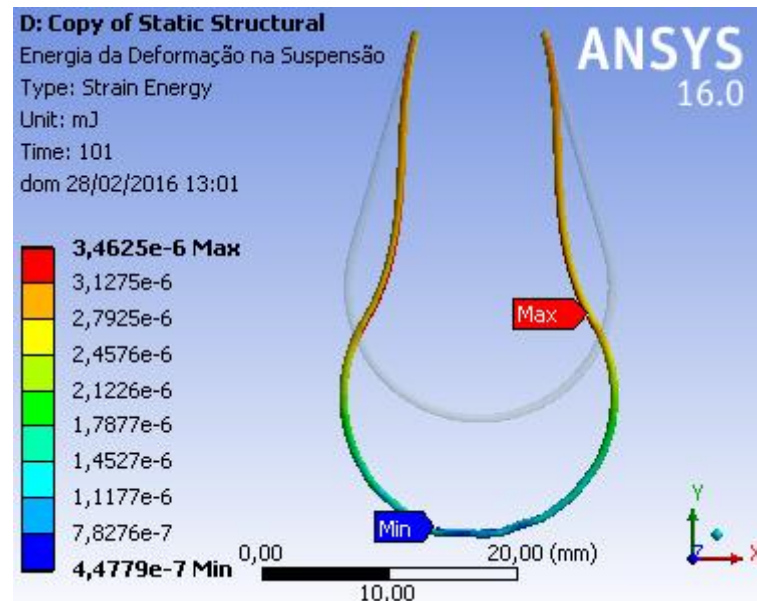


Figura 44 - Em destaque os pontos de maior (*Max*) e menor (*Min*) absorção de energia.

A tensão causada pelo esforço no fio da suspensão pode ser visualizado na Figura 45. Desde que o limite de escoamento não seja atingido não há motivos para se aumentar o diâmetro do fio da suspensão.

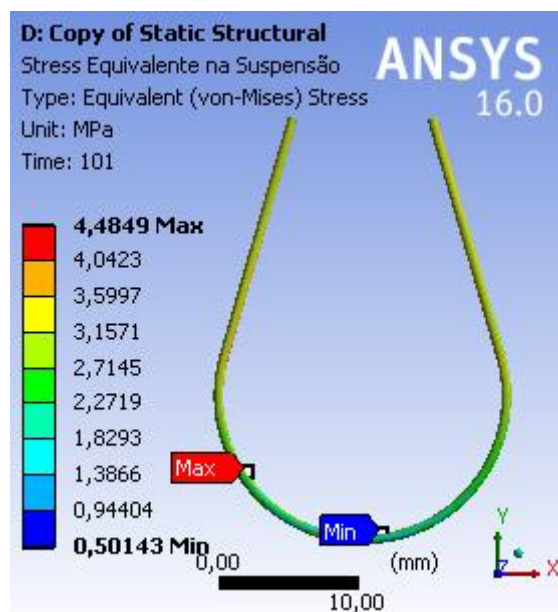


Figura 45 - Distribuição da *Stress* no fio da suspensão.

No gráfico da Figura 46 há a evolução do *Stress* no fio da suspensão ao longo do tempo.

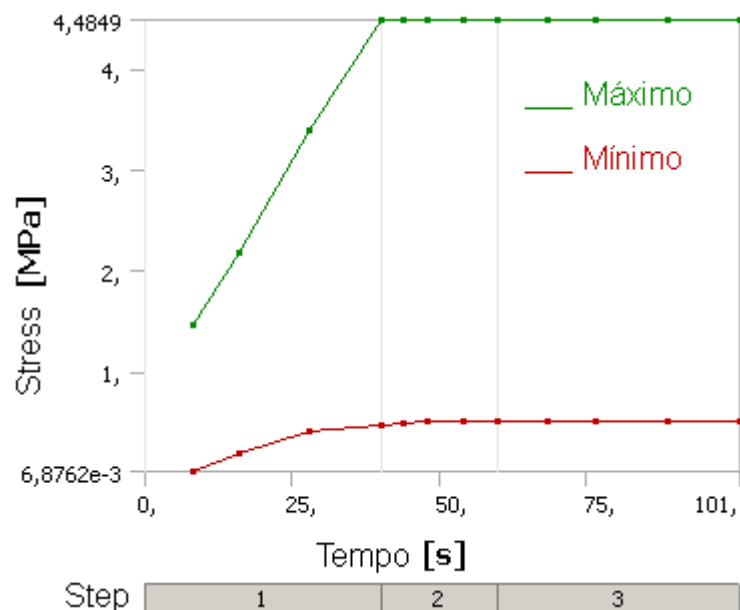


Figura 46 - Evolução do *Stress* no fio da suspensão.

Os dados desse gráfico podem ser analisados na Quadro 7. No passo (*Step*) 3 pode-se observar o alívio da tensão causada pela diminuição da temperatura, esse alívio é sutil mas perceptível nas zonas de menor *Stress*.

Quadro 7 - Evolução do <i>Stress</i> no fio da suspensão. <i>Stress</i> Medido no ponto de menor e de maior valor.			
Step	Tempo [s]	Menor <i>Stress</i> [MPa]	Maior <i>Stress</i> [MPa]
1	8,00	0,00687620	1,46630
	16,00	0,17855000	2,17710
	28,00	0,39677000	3,40010
	40,00	0,47430000	4,48470
2	44,00	0,47612000	4,48470
	48,00	0,50099000	4,48490
	54,00	0,50187000	4,48490
	60,00	0,50158000	4,48490
3	68,20	0,50145000	4,48490
	76,40	0,50137000	4,48490
	88,70	0,50144000	4,48490
	101,00	0,50143000	4,48490

O detector também sofre deformação causada pela inflexão de seu próprio peso e *Stress* na região de contato com o fio da suspensão.

Na Figura 47 é possível observar em escala ampliada a deformação do detector devido ao seu próprio peso. As extremidades do detector causam momento na região central do corpo. As extremidades funcionam como duas alavancas. Essa deformação é ínfima, porém ainda assim é possível visualizá-la através da ampliação da escala de visualização.

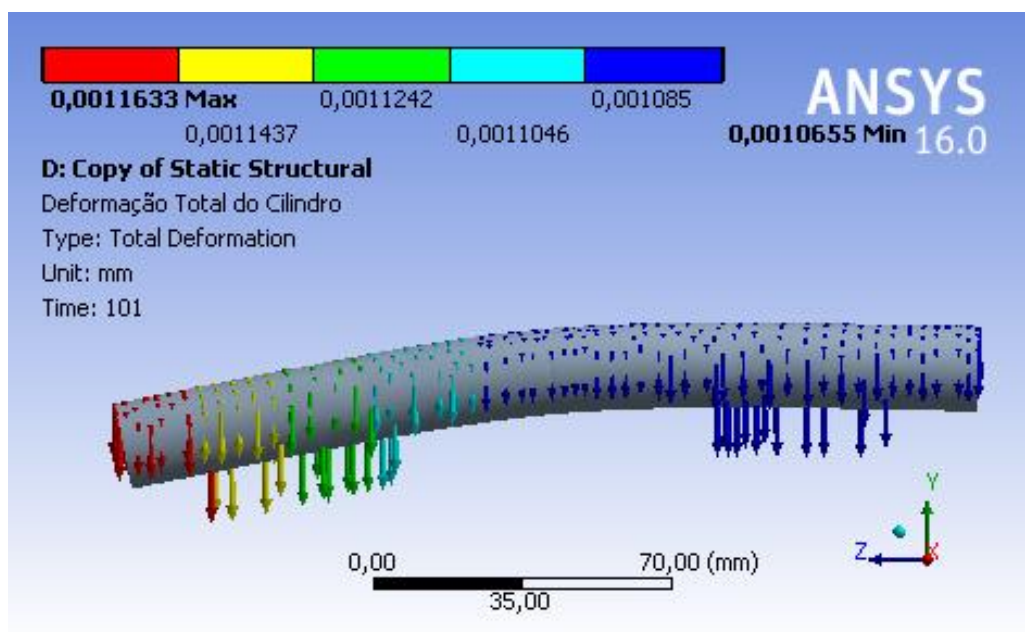


Figura 47 - Deformação do detector ocasionada pelo próprio peso em escala ampliada.

Na Figura 48 pode-se observar o *Stress* causado pela pressão da superfície do detector com o fio da suspensão. A região caracterizada nas figuras (A), (B) e (D) apresentam valores sutis de *Stress* que fica marcada como um fio, já a região (C) é marcada pelo *Stress* causado pela deformação do cilindro dada pelo próprio peso de sua massa. Como o comprimento do cilindro é muito maior que seu diâmetro ocorre um momento na região central causado pela inflexão do detector devido ao seu próprio peso.

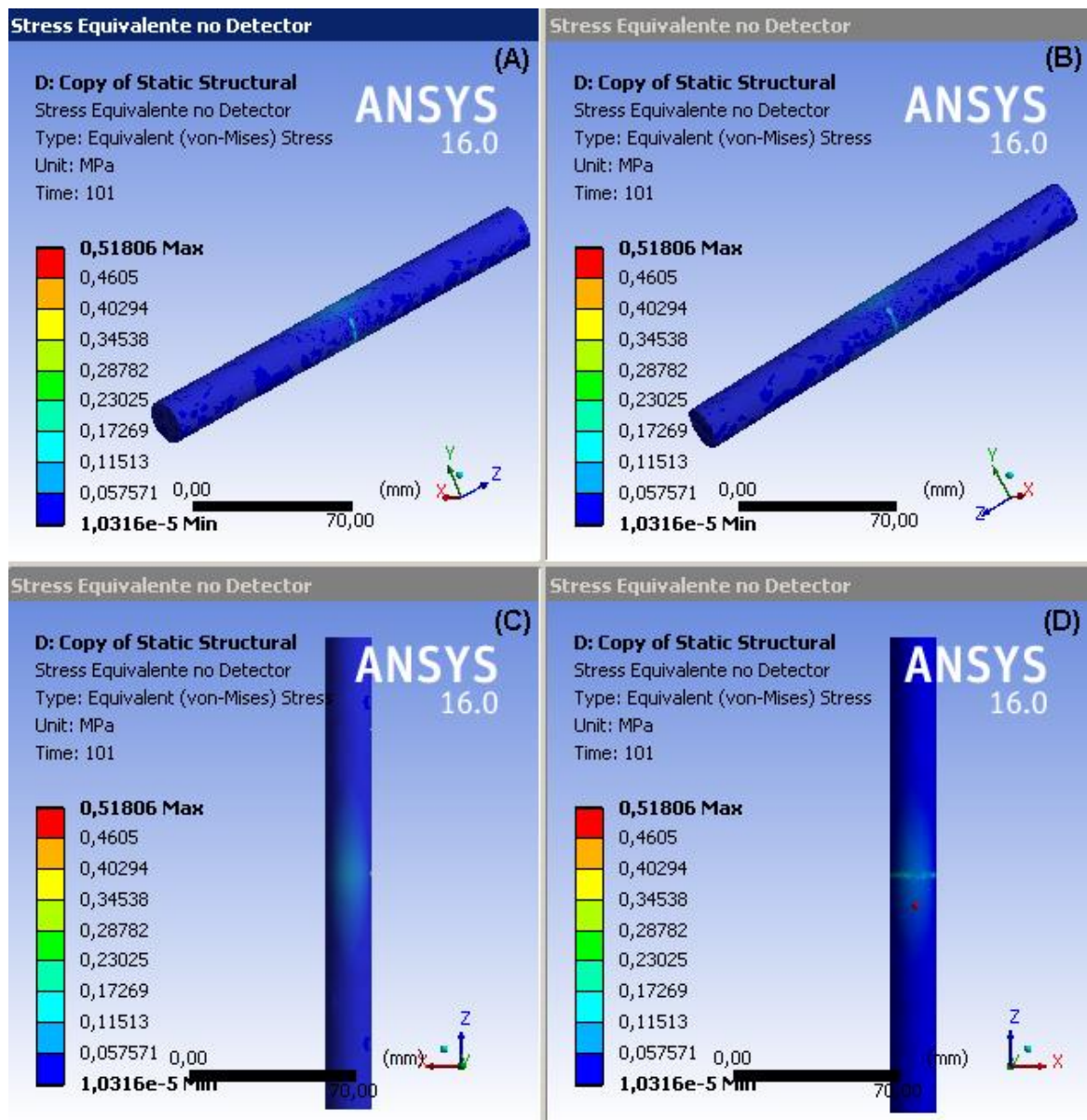


Figura 48 – Visão em vários ângulos do *Stress* no detector. A região vista em (A), (B) e (D) se referem ao contato entre o fio e o cilindro, já a região (C) se dá graças a inflexão da peça com o peso próprio.

Utilizando a ferramenta *Stress Tool* pode-se avaliar se haverá ruptura de alguma das peças envolvidas, e para isso basta utilizar a análise *Safety Factor* que visa calcular o coeficiente de segurança de toda a estrutura. Um coeficiente de segurança próximo de 1 significa que as pressões, tensões e esforços mecânicos atuam com valores que fazem com que a peça esteja submetida a reações próximas de seu limite de escoamento, já um coeficiente de segurança acima de 1 significa que esses esforços mecânicos estão trabalhando fora dos limites de deformação plástica das peças. Na Figura 49 é exibida a aplicação dessa ferramenta de análise para avaliar o coeficiente de segurança dos elementos da estrutura.

Podemos observar ainda nessa figura, que o coeficiente de segurança é igual a 15 significando que a estrutura suporta todas as reações de esforços causados pelo peso próprio e não haverá ruptura de nenhuma das peças envolvidas.

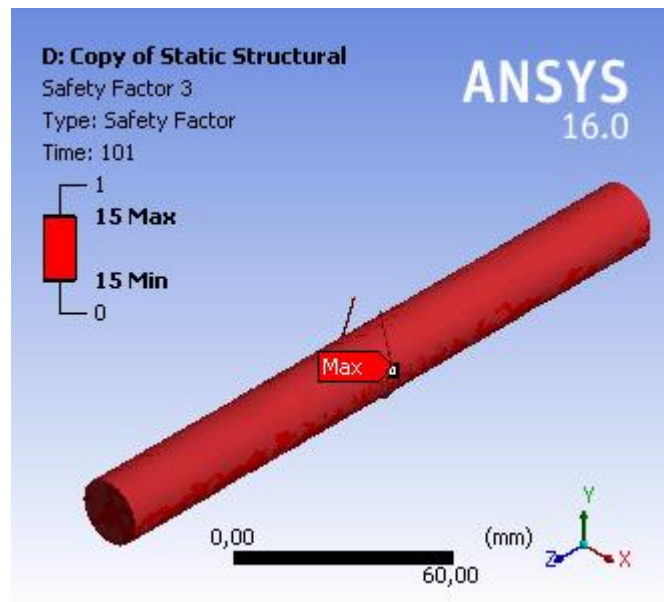


Figura 49 - Coeficiente de segurança de todos os elementos da estrutura.

3.4 SIMULAÇÃO MODAL

A SM (Simulação Modal) visa investigar em que frequência irá ocorrer o modo vibracional que melhor se acopla a um SGMP, essa frequência definirá inclusive os parâmetros para se realizar os cálculos de velocidade de rotação do motor utilizado no Gerador de Sinal de Ondas Gravitacionais de Maré Periódicas. O modo que melhor se acopla a SGMP foi apresentado na Figura 5, e na Figura 2 observa-se que a SGMP realiza trabalho axial, comprimindo e alongando o corpo do detector.

Para se realizar essa simulação o ANSYS® avalia as soluções da SEE para ajustar os parâmetros de cálculo da SM. Será utilizado o mesmo suporte de fixação herdado da SEE. A Figura 50 apresenta o esquema adotado pelo ANSYS® para as próximas análises. Os parâmetros de solução de uma análise são passados a outra, logo para se realizar a SM há a necessidade de se realizar a SEE.

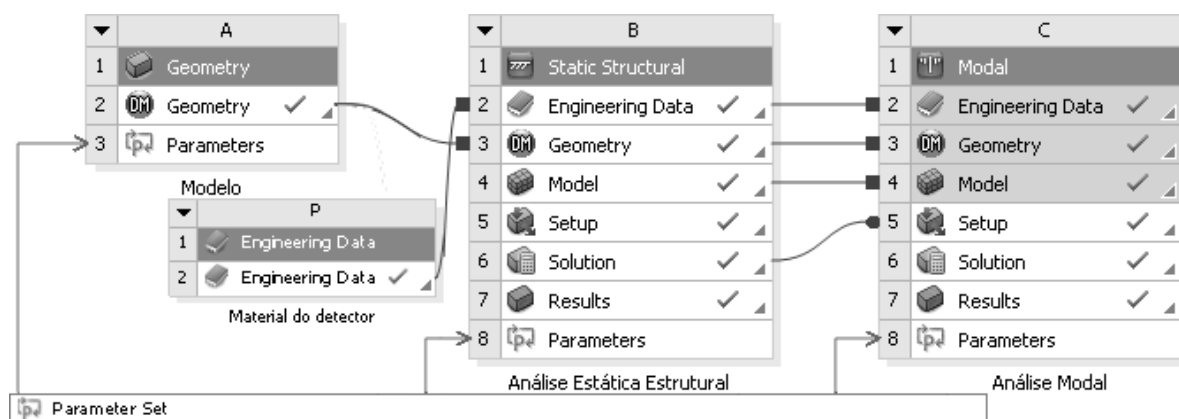


Figura 50 - Esquema adotado pelo ANSYS®. A informação de Solução de uma análise ajusta os parâmetros da próxima análise.

3.4.1 INVESTIGANDO OS MODOS NATURAIS

Para se investigar os modos naturais a fim de se descobrir em que frequência ocorre o modo vibracional de interesse, estabeleceu-se a busca dos cem primeiros modos e a análise qualitativa de cada um deles verificando se o formato de vibração corresponde ou não ao modo de interesse.

Ajustada a quantidade de modos investigados e executada a simulação, foram encontrados os cem primeiros modos apresentados na Quadro 8:

Modo	Frequência [Hz]	Modo	Frequência [Hz]	Modo	Frequência [Hz]	Modo	Frequência [Hz]
1	2,50	16	16734,00	31	36048,00	46	65856,00
2	3,51	17	17097,00	32	36053,00	47	68315,00
3	16,65	18	17820,00	33	41915,00	48	69621,00
4	22,08	19	17820,00	34	49983,00	49	74868,00
5	601,97	20	21809,00	35	50396,00	50	77639,00
6	944,08	21	23183,00	36	50400,00	51	80200,00
7	4726,10	22	23198,00	37	51305,00	52	81256,00
8	4779,80	23	25301,00	38	53516,00	53	81824,00
9	6188,40	24	27191,00	39	54229,00	54	81867,00
10	6188,70	25	30886,00	40	54588,00	55	82307,00
11	6532,40	26	32810,00	41	56198,00	56	82323,00
12	6533,00	27	34152,00	42	56202,00	57	85586,00
13	12485,00	28	34508,00	43	57670,00	58	86626,00
14	12487,00	29	34509,00	44	64394,00	59	86718,00
15	16718,00	30	34861,00	45	65840,00	60	87887,00

Continuação do Quadro 8.			
Modo	Frequência [Hz]	Modo	Frequência [Hz]
69	113120,00	85	145620,00
70	113150,00	86	147350,00
71	113160,00	87	147360,00
72	115200,00	88	149510,00
73	115540,00	89	149730,00
74	117630,00	90	154600,00
75	119860,00	91	156470,00
76	119970,00	92	157920,00
77	124620,00	93	160060,00
78	130270,00	94	163350,00
79	132630,00	95	164520,00
80	132700,00	96	166630,00
81	134310,00	97	166730,00
82	135460,00	98	169900,00
83	137450,00	99	170190,00
84	141110,00	100	171690,00

3.4.2 O MODO DE INTERESSE

Cada um desses modos apresentados no Quadro 8 possui uma forma particular de vibração, mas o modo 24 apresenta o mesmo modo de vibrar da Figura 5. A peça irá ressonar na frequência aproximada de 27191 *Hz*.

O semiciclo de compressão do modo de vibrar 24 é visualizado na Figura 51. No momento (A) a peça se encontra com deformação zero e o ciclo evolui para a contração nos momentos (B), (C) e (D).

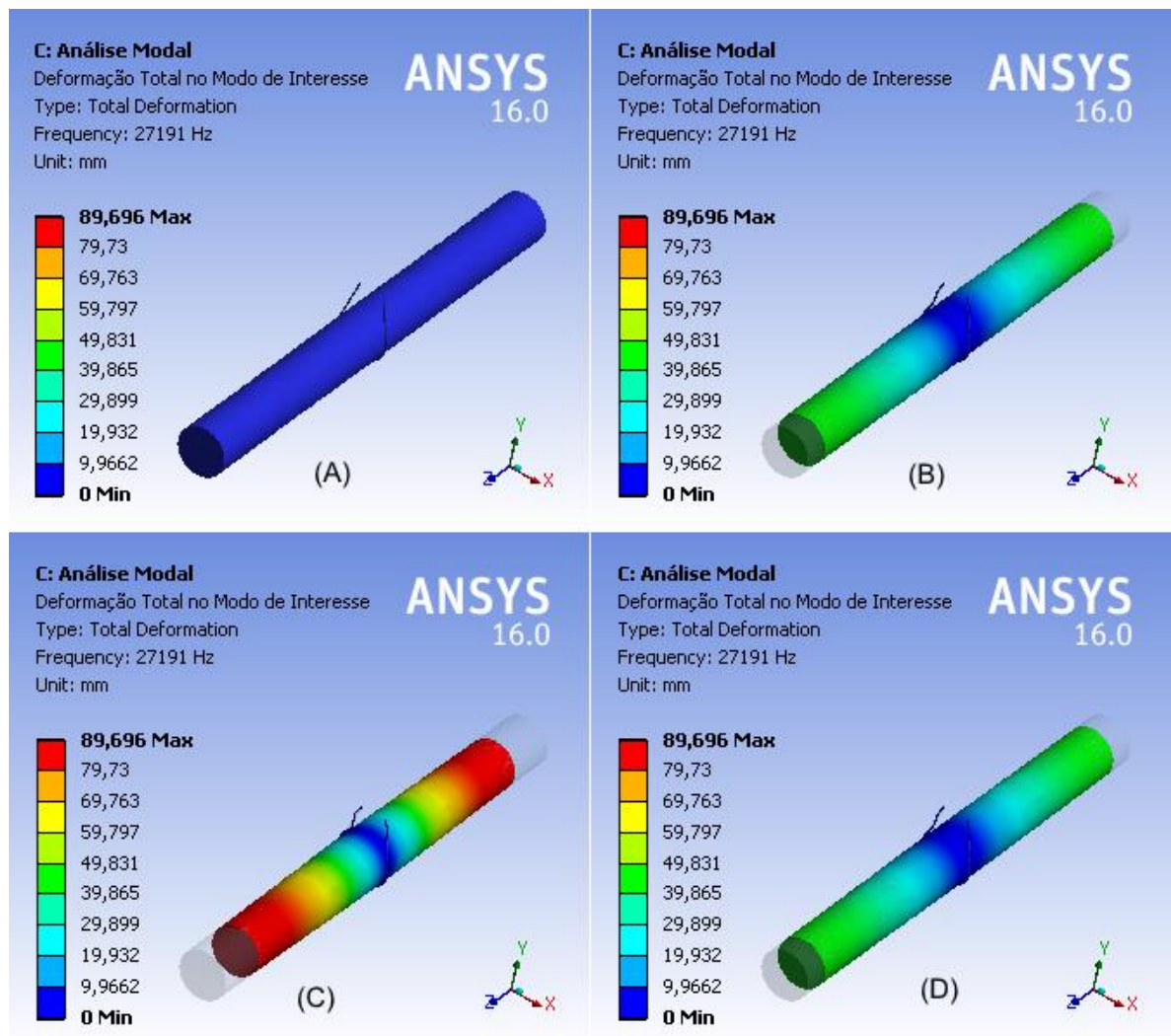


Figura 51 - Evolução no tempo do ciclo de compressão do modo de vibrar 24 da SM.

Na Figura 52 é mostrado o semiciclo de expansão da peça cilíndrica. No momento (A) a peça encontra-se com deformação zero e o ciclo evolui através dos momentos (B), (C) e (D).

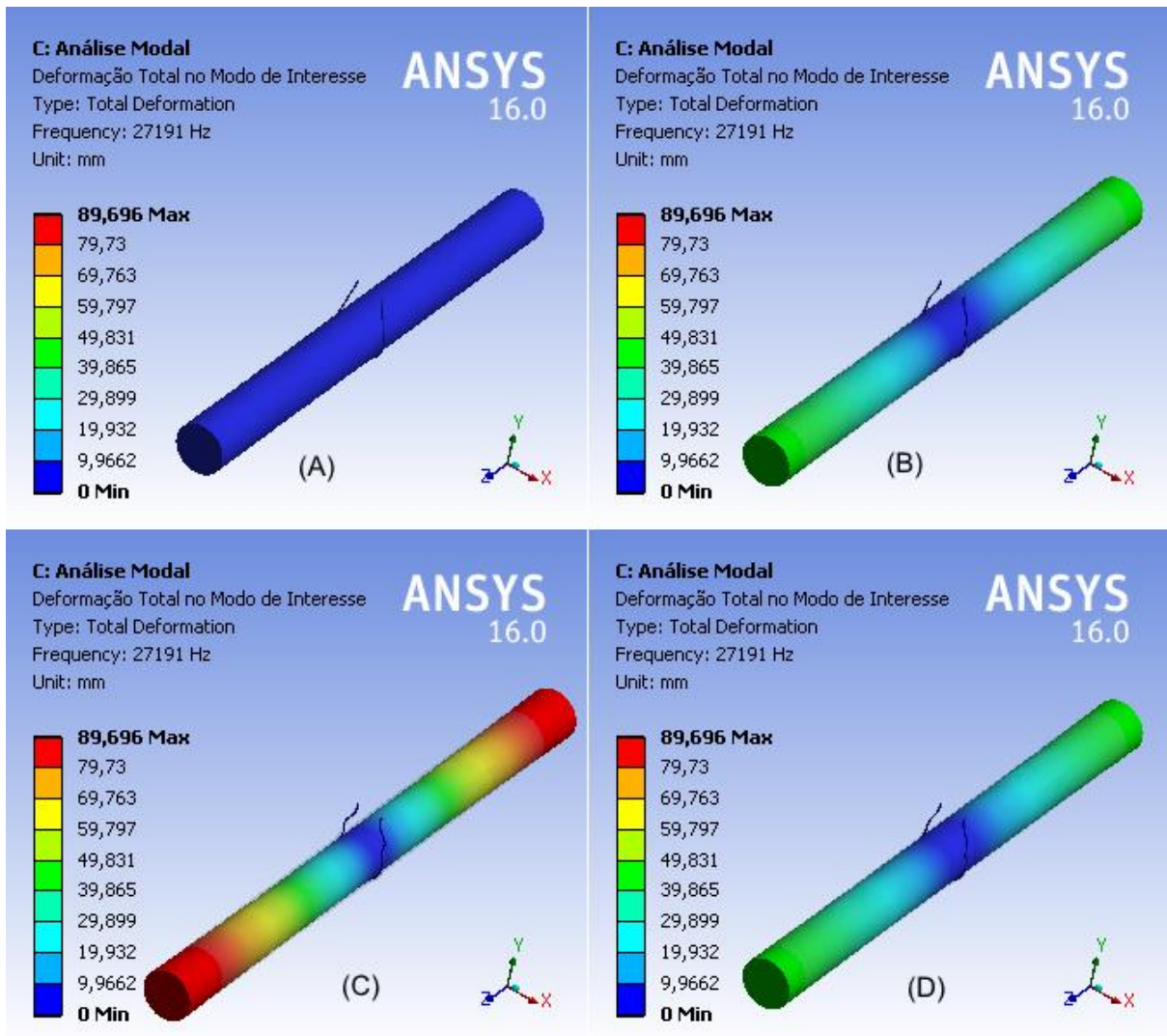


Figura 52 – Evolução no tempo do Semiciclo de expansão do cilindro no modo de vibrar 24.

O modo 24 do Quadro 8 comprime e expande a peça cilíndrica do detector realizando trabalho axial na peça. Esse modo de vibrar se acopla bem ao SGMP.

3.4.3 OS MODOS ADJACENTES

Os modos adjacentes ao modo de interesse podem encontrar-se em uma faixa de frequência muito próxima daquela do modo de interesse, isso pode ocasionar o acoplamento dos modos adjacentes durante o processo de excitação pelos SGMP. É importante avaliar os modos adjacentes e a distância que esses apresentam do modo de interesse.

Na Figura 53 é apresentado o modo 25 que ocorre na frequência aproximada de 30886 Hz, nesse modo apenas a suspensão vibra e está separado do modo de interesse em aproximadamente 3695 Hz. Esse é o modo acima do modo de interesse.

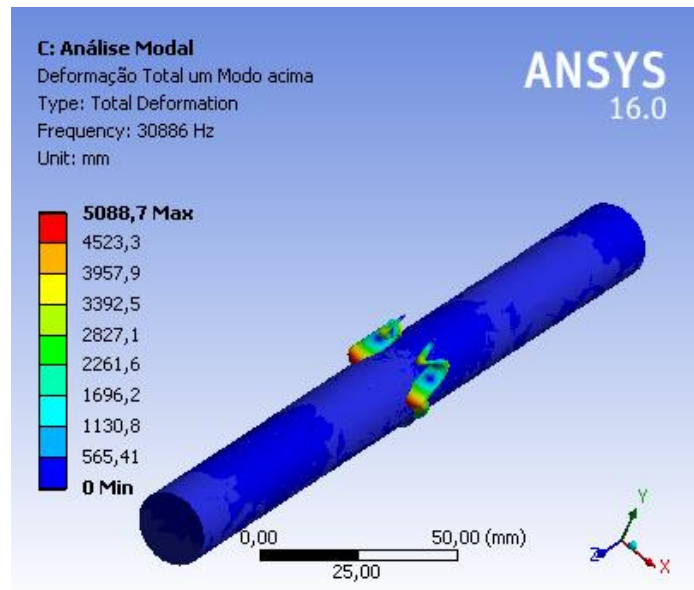


Figura 53 - Um modo acima do modo de interesse. Percebe-se a vibração apenas da suspensão.

Na Figura 54 podemos observar o comportamento do modo 23 que está abaixo do modo de interesse, esse modo faz apenas a suspensão vibrar, ocorre em aproximadamente 25301 *Hz* e está separado do modo de interesse em aproximadamente 1890 *Hz*.

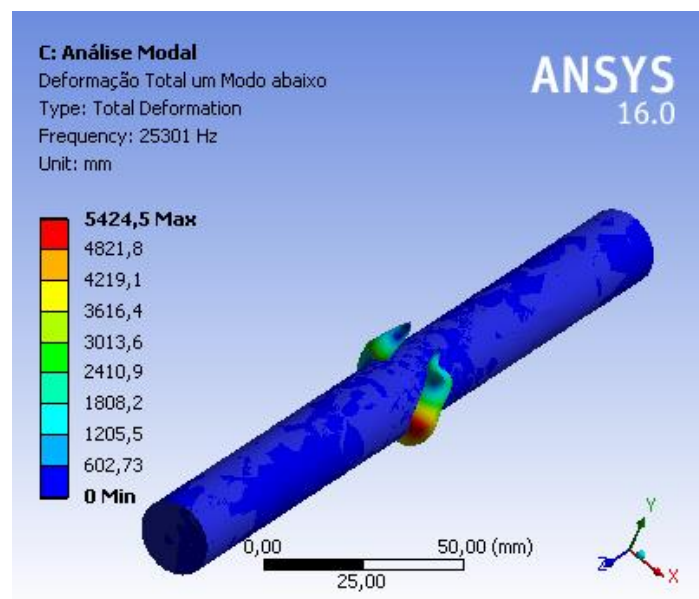


Figura 54 - Um modo abaixo do modo de interesse. Mais uma vez a vibração ocorre apenas na suspensão.

Na Figura 55 visualiza-se o segundo modo de vibrar acima da frequência de interesse, ou seja, o modo 26, nesse modo apenas a suspensão vibra, ele encontra-se distante da frequência do modo de interesse em 5619 *Hz*.

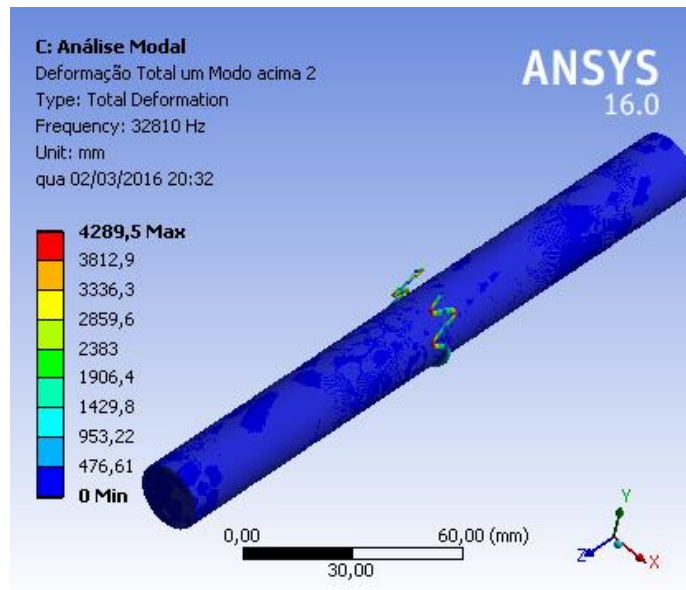


Figura 55 - Segundo modo acima do modo de interesse, modo 26.

Na Figura 56 é exibido o segundo modo com frequência abaixo da frequência do modo de interesse, nesse modo tanto a suspensão quanto a peça do detector vibram. Esse modo encontra-se na frequência de 23198 *Hz* e está distante do modo de interesse 3993 *Hz*.

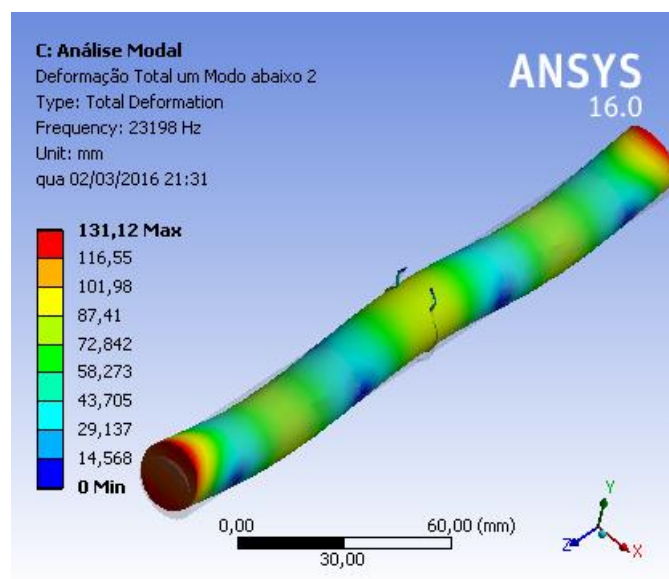


Figura 56 - Segundo modo abaixo do modo de interesse, modo 22.

3.5 SIMULAÇÃO HARMÔNICA

A SH (Simulação Harmônica) permite avaliar o comportamento mecânico da estrutura ao se aplicar um sinal harmônico senoidal variando-se sua frequência dentro de uma banda de frequência, dessa forma é possível verificar a possível interferência dos modos adjacentes ao

modo de interesse, determinar com acurácia a frequência de ressonância do modo de interesse e calcular o QM da estrutura através da análise da resposta em frequência da estrutura para sinais harmônicos externos.

Durante a SH o ANSYS® toma todos os sinais de carga (que nessa situação são todos os sinais de excitação), mantém o módulo dos fasores dos sinais e varia a frequência deles. As ferramentas de análise colherão informações em função da frequência, por exemplo, utilizando a ferramenta de análise de deformação poderíamos verificar a resposta em frequência da deformação do cilindro em um dado eixo ou direção.

3.5.1 APLICAÇÃO DAS CARGAS DE SIMULAÇÃO HARMÔNICA

Para se realizar a simulação da resposta harmônica necessita-se posicionar as cargas mecânicas que irão realizar trabalho sob a peça. Serão postas duas forças com sentidos opostos, mas de mesmo módulo, normais às faces axiais do cilindro do detector, que realizarão ciclos alternados de compressão e estiramento. Essas forças simularão a ação de uma SGMP realizando trabalho no eixo axial do cilindro. A Figura 57 exibe a posição dos vetores de força aplicados nas faces axiais, ambas as faces receberão vetores de força normais às faces e de mesmo módulo.

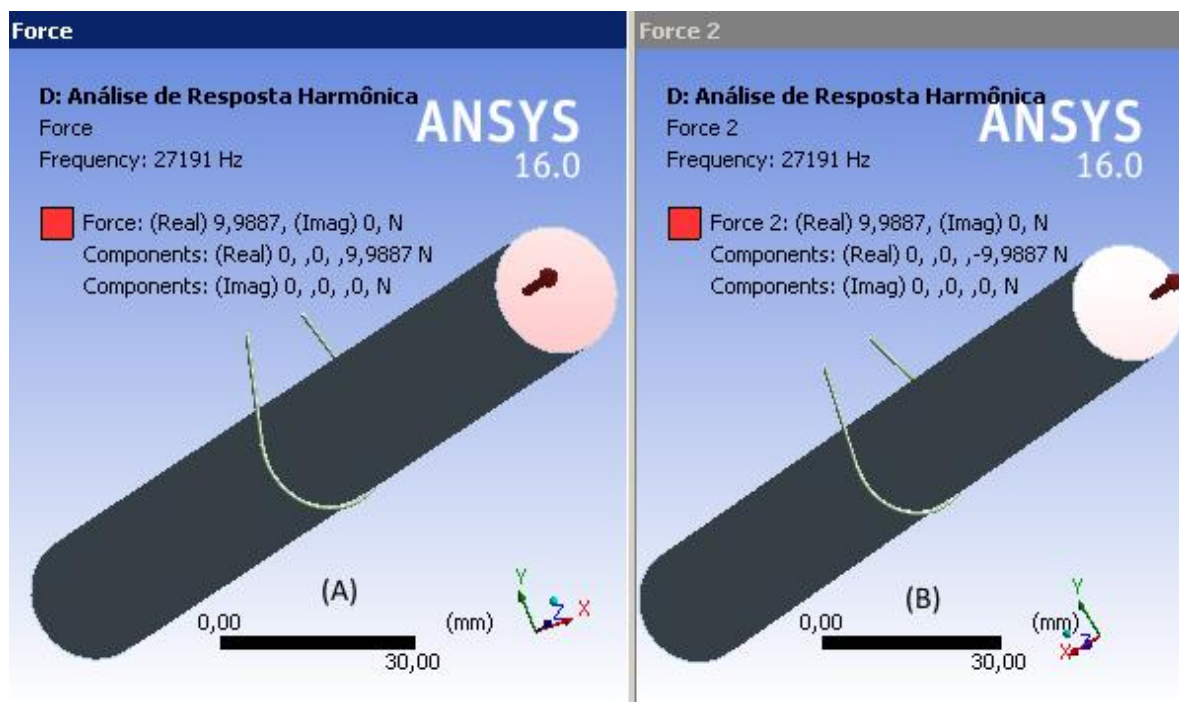


Figura 57 - Posicionamento das cargas mecânicas para simulação de resposta harmônica.

O módulo do vetor de força que foi ajustado não influencia no posicionamento dos modos vibracionais, influencia apenas na amplitude da resposta em frequência. Para o ajuste da força nessa análise é necessário o estabelecimento de um valor que não cause deformação plástica, ou seja, que cause um comportamento não linear.

A amplitude do sinal de interação gravitacional dependerá das massas utilizadas na fabricação do GSGMP (Gerador de Sinais Gravitacionais de Maré Periódicos), mas uma deformação plástica causada pelo sinal do GSGMP é algo inconcebível dada a ordem de grandeza do sinal gerado e também devido a natureza das interações gravitacionais ser muito fraca com a matéria. Para realizar a simulação de resposta em frequência se escolheu um módulo de força igual a $9,9887\text{ N}$, seu valor nada influencia na determinação dos parâmetros como a banda dos modos vibracionais e o QM da estrutura, apenas não causará deformações plásticas na peça, qualquer valor de esforço que não cause ruptura no cilindro de safira poderia ser utilizado nessa simulação.

3.5.2 INVESTIGANDO A RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DA ESTRUTURA

Nas frequências de ressonância espera-se que haja picos na resposta em frequência da deformação mecânica do cilindro, esses picos indicam máxima deformação da peça dentro daquela banda de frequências, isso ocorre devido ao fenômeno de ressonância da peça. A distância entre os picos permite estabelecer parâmetros que possibilitarão fornecer informações para a construção do GSGMP.

Para investigar a resposta em frequência da estrutura deve-se delimitar uma banda de frequências, e optou-se por uma banda que envolvesse ao menos 2 modos acima e abaixo da frequência de ressonância. A resposta em frequência da deformação da peça nas direções dos eixos x, y e z devem ser analisadas, o modo de interesse é aquele que realiza trabalho no eixo z do cilindro.

A banda utilizada na simulação é aquela entre 23198 Hz e 32810 Hz , que compreende os modos 22, 23, 24, 25 e 26.

A seguir serão apresentados os gráficos de resposta em frequência obtidos através da simulação harmônica. Com esses gráficos podemos verificar o comportamento em frequência das deformações e analisar o comportamento dos modos em torno do modo de interesse.

Na Figura 58 nota-se dentro da banda de frequências que ocorre um pico na frequência do modo de interesse. Essa resposta em frequência mede a deformação da peça cilíndrica no eixo z, como as forças aplicadas são normais às faces axiais do cilindro e a excitação harmônica passa pela frequência do modo de interesse, na frequência do modo de interesse a peça entra em ressonância fazendo com que ocorra um pico de amplitude naquela frequência.

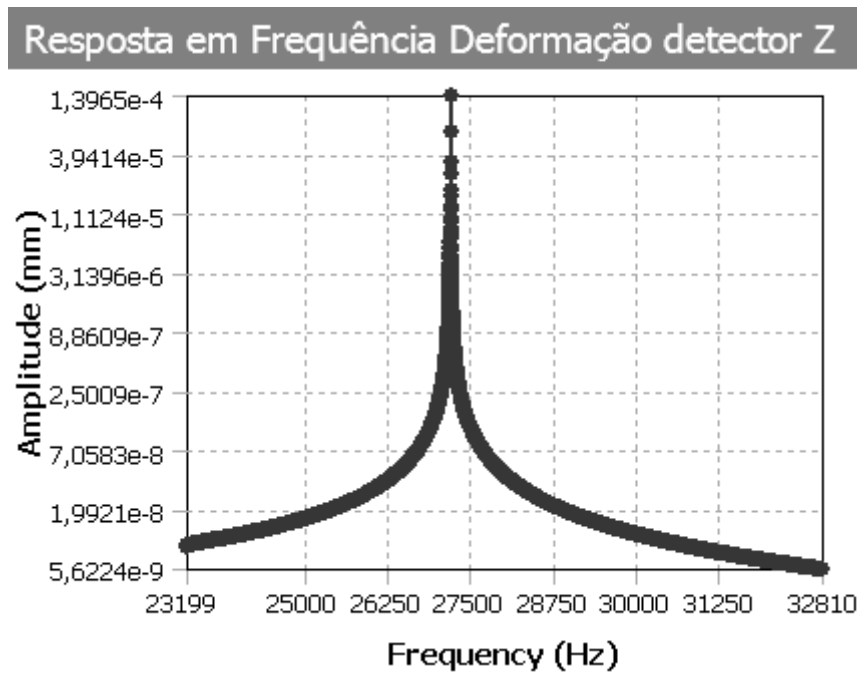


Figura 58 - Resposta em frequência da deformação do cilindro no eixo z na banda de 23199 Hz a 32810 Hz.

Na Figura 59 é apresentada a resposta em frequência da deformação no eixo x, dentro da banda de frequências estudada, e notam-se dois picos, onde o primeiro pico ocorre na frequência do segundo modo abaixo do modo de interesse, aproximadamente 23198 Hz, e o pico seguinte ocorre na frequência do modo de interesse, aproximadamente 27191 Hz, respectivamente os modos 22 e 24.

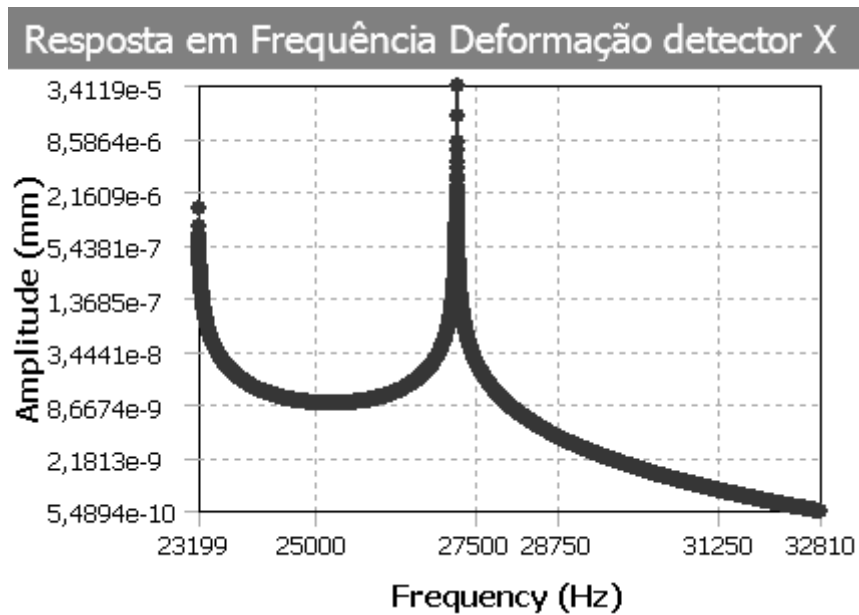


Figura 59 - Resposta em frequência da deformação do cilindro no eixo x na banda de 23199 *Hz* a 32810 *Hz*.

Em outros modos adjacentes ao modo 22 e 24, nota-se que a deformação é mínima, isso porque a deformação causada na peça cilíndrica se dá apenas devido à interação dos modos de vibrar da suspensão.

O gráfico da resposta em frequência no eixo y na Figura 60 mostra um padrão de deformação parecido com o da Figura 59, ou seja, o modo 22 é destacado deformando a peça e o modo 24 também.

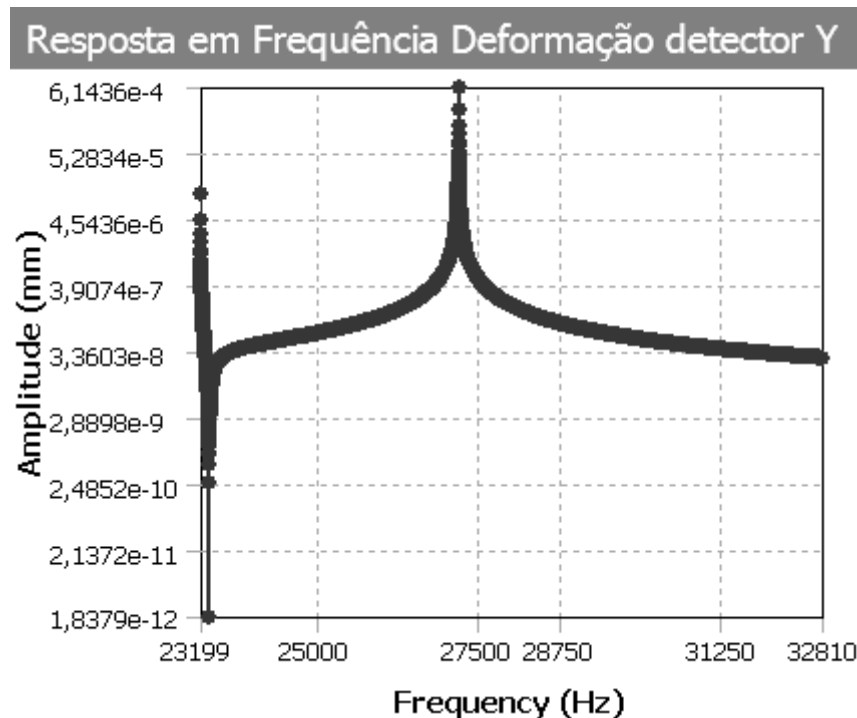


Figura 60 - Resposta em frequência da deformação do cilindro no eixo y na banda de 23199 *Hz* a 32810 *Hz*.

A deformação ocorrida na frequência do modo de interesse deforma o detector em todos os eixos, já o modo 22 afeta exclusivamente os eixos x e y. Os modos adjacentes que excitam exclusivamente os modos da suspensão (modos 23, 25 e 26), não contribuem para a deformação do detector.

3.5.3 CÁLCULO DO Q MECÂNICO

A característica apresentada pelo detector para a excitação harmônica mecânica é a de um filtro de frequências com característica seletiva, cuja resposta em frequência possui maior amplitude na frequência de ressonância dada pelo modo de interesse (modo 24, aproximadamente 27191 *Hz*).

Estreitando a banda de frequência em torno do ponto de ressonância é possível calcular o QM da estrutura e verificar grandes deformações. As Figura 61 e Figura 62 exibem o gráfico da resposta em frequência numa banda de 0.0002 *Hz* respectivamente da amplitude e ângulo de fase.

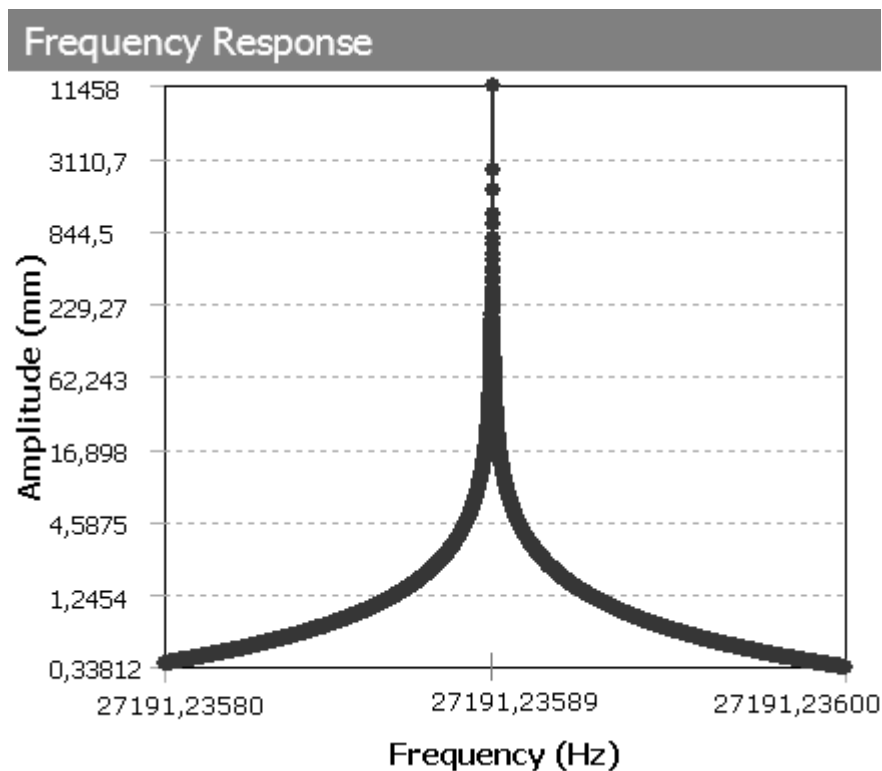


Figura 61 - Resposta em frequência da amplitude em torno da frequência do modo ressonante de interesse.

Como o software trabalha coletando amostras de resposta em frequência, e foi ajustada uma quantidade de 12000 amostras por intervalo, a resposta da banda apresentada na Figura 58 dá apenas uma idéia do comportamento da resposta em frequência, essa mesma quantidade de amostras é aplicada ao gráfico de resposta em frequência apresentado na Figura 61, significa que a resolução do gráfico nessa nova faixa é melhor que na Figura 58, dado o tamanho da banda e a quantidade de respostas por intervalo.

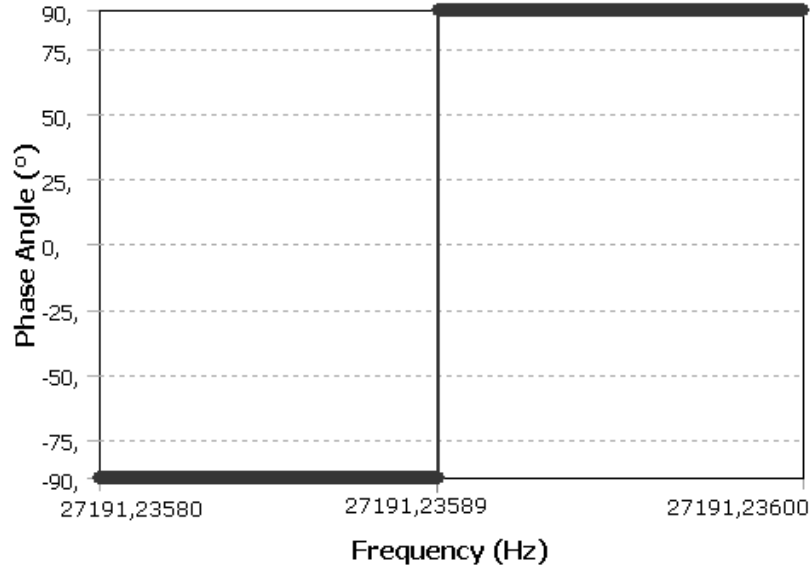


Figura 62 - Resposta em frequência do ângulo de fase do sinal em torno do modo ressonante de interesse.

Para se calcular o QM da estrutura partindo do gráfico de resposta em frequência deve-se determinar a frequência central de oscilação (f_c) e a banda de frequência ($\Delta f = f_0 - f_1$) que satisfaz (10):

$$A_{\Delta f} \geq \frac{A_{f_c}}{\sqrt{2}} \quad (10)$$

Onde:

$A_{\Delta f}$: Amplitude do sinal dentro da banda Δf

A_{f_c} : Amplitude do sinal na frequência central

O QM pode ser calculado através de (11):

$$QM \cong \frac{f_c}{\Delta f} \quad (11)$$

Onde:

QM : Q mecânico

f_c : Frequência central do modo de interesse

Δf : Banda passante do sinal mecânico

Partindo do gráfico da Figura 61 e realizando a interpolação dos dados do gráfico da Figura 63:

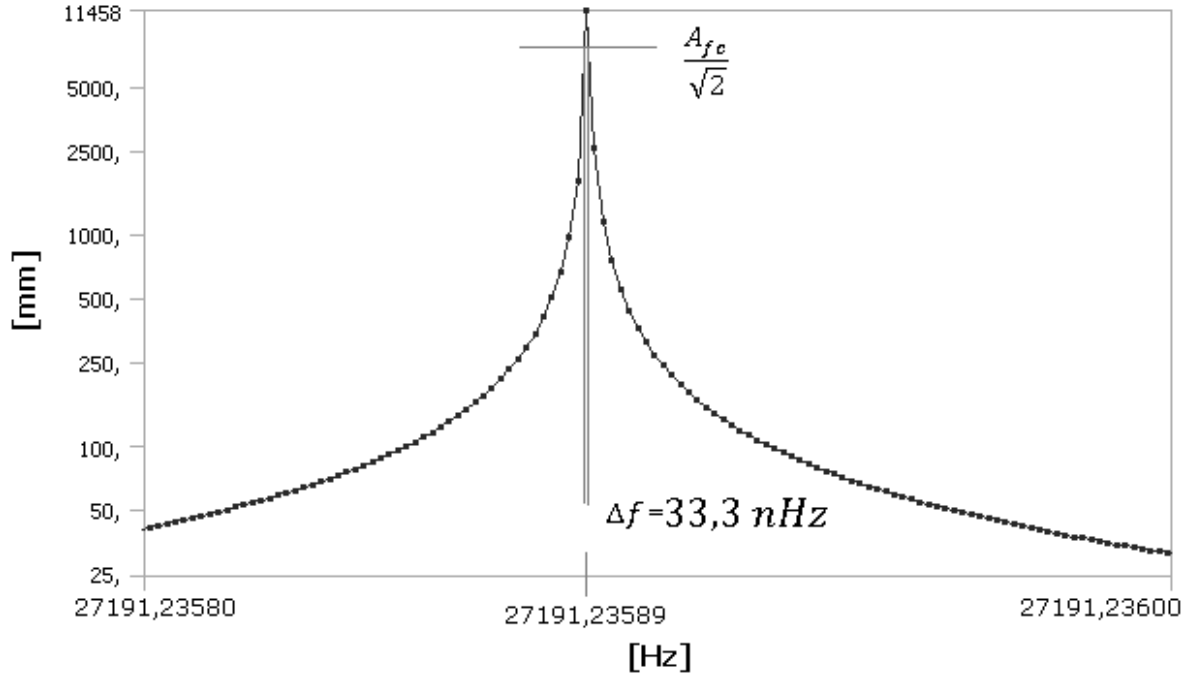


Figura 63 - Aproximação para o cálculo de QM.

Substituindo-se os dados obtidos a partir da Figura 63 em (11). Obtém-se o QM (12):

$$QM \cong \frac{27191.23589}{33.3 \times 10^{-9}} \Rightarrow QM \cong 8.24 \times 10^{11} \quad (12)$$

Que é um valor consideravelmente alto visto que certos materiais apresentam QM com valores abaixo do que o apresentado em (12), o que garante uma seletividade para uma excitação harmônica senoidal, logo o GSGMP deve garantir uma estabilidade, baixo ruído de fase e um ajuste fino da frequência do SGMP produzido para que esse possa excitar o detector em sua frequência central (f_c) e dentro de sua banda de frequência de detecção (BWD).

$$f_c = 27191.23589 \text{ Hz} \quad BWD = 33,33 \text{ nHz} \quad (13)$$

3.5.4 EXCITAÇÃO HARMÔNICA SENOIDAL EM FREQUÊNCIA FORA DA RESSONÂNCIA

Na Figura 64 (A) podemos verificar a resposta em frequência da deformação causada por uma excitação mecânica axial com magnitude de 19,9774 N numa banda de frequência abaixo do modo ressonante de interesse ($f \cong 25301 \text{ Hz}$), e a deformação causada por uma

excitação harmônica na frequência central da banda, nessa figura está destacando-se a deformação total ocorrida na direção axial do cilindro (eixo z), em contrapartida a Figura 63 exibe uma banda de excitação harmônica com forças de mesma magnitude, porém ocorrendo na frequência de ressonância do modo de interesse, comparando as deformações observa-se que na frequência de ressonância, ocorre uma ampliação da deformação e essa característica contribui para a detecção do SGMP, pois aumenta a sensibilidade do detector à excitação desse tipo de sinal, além de não haver a necessidade de se utilizar amplificadores mecânicos, pois no modo ressonante a deformação é tal que dispensa esse tipo de mecanismo, devido a grande absorção de energia desse modo.

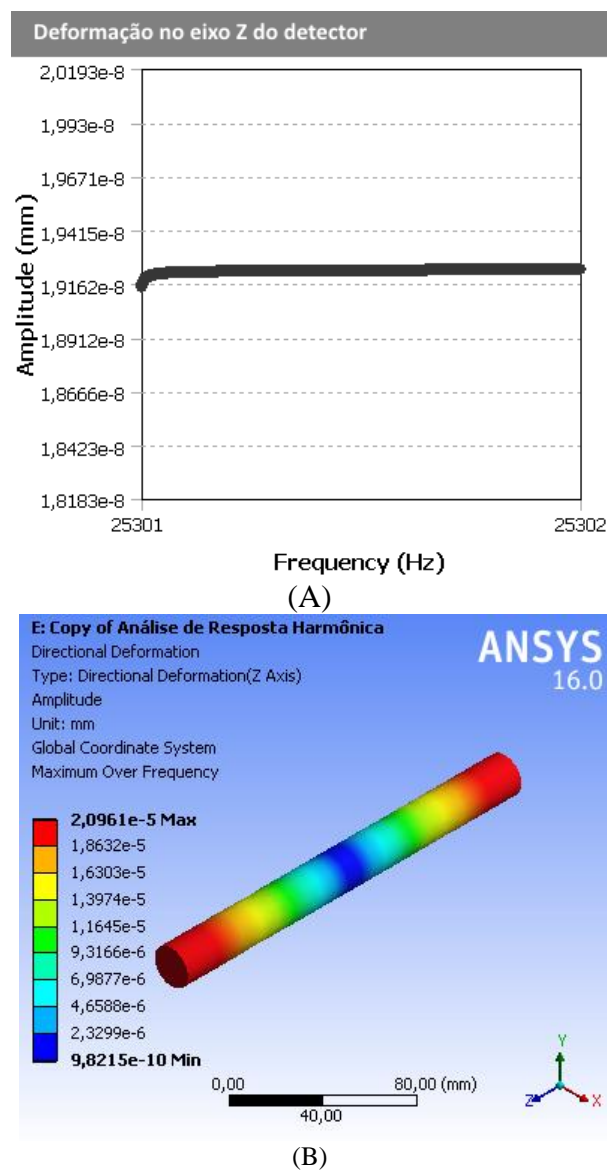


Figura 64 – (A) Resposta em frequência na banda de 25301 Hz a 25302 Hz
 (B) Deformação na frequência central da banda.

4 SIMULAÇÃO ELÉTRICA (SE)

O detector cilíndrico de safira também realiza a transdução elétrica do SGMP. A safira tem um papel importante na transdução do SGMP, pois ela é um material que possui alto QE e alto QM. A condição de alto QM permite sintonizar o SGMP em uma frequência específica, pois a safira se comporta como um oscilador harmônico mecânico com uma banda estreita e apresenta alta amplitude de deformação na frequência de ressonância devido o baixo coeficiente de amortecimento, já o alto Qe permite que a safira apresente as mesmas propriedades para o sinal elétrico e se comporte como ressonador dielétrico, entrando em ressonância em uma frequência harmônica específica, estocando energia e dessa forma quando uma distorção mecânica causada por um SGMP atua no ressonador, altera-se o comportamento do dielétrico, isso faz com que sua frequência de ressonância mude de posição dentro de uma banda de frequências, essa mudança de posição é utilizada como parâmetro para a detecção nas deformações mecânicas da peça cilíndrica de safira.

O estudo realizado através da SE visa analisar em qual frequência ocorre a ressonância elétrica no dielétrico de safira e avaliar a sua resposta em frequência para uma banda de frequências, determinando o seu QE.

A ferramenta de software utilizada aqui para realizar a SE é o MWS (CST Microwave Studio®). Essa ferramenta utiliza a FIT (Técnica da Integração Finita, do inglês *Finite Integration Technique*) que discretiza as Equações de Maxwell na sua forma integral (WEILAND, 1977), e utiliza também o FDTD (Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo, do inglês *Finite Difference Time-Domain Method*), esse método consiste em tomar todas as derivadas no domínio do espaço e do tempo das equações de Maxwell e discretizá-las através de expressões de diferenças finitas (YEE, 1966).

4.1 DESENHO GEOMÉTRICO DOS SÓLIDOS – CILINDRO SEM FURO

O ANSYS® permite que o arquivo do modelo construído seja exportado para o trabalho no MWS, dessa forma não há a necessidade de se realizar a construção do modelo novamente, porém ainda deve-se construir a planta de excitação elétrica utilizada para levantar a resposta em frequência do detector.

O modelo da Figura 65 apresenta a planta utilizada para a excitação elétrica e avaliação da resposta em frequência sem o detector posicionado.

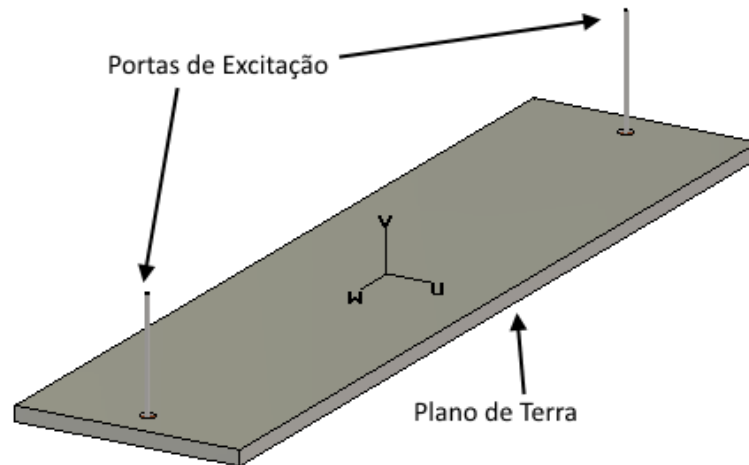


Figura 65 - Planta utilizada na excitação.

O detector é posicionado entre as portas de excitação e acima do plano de terra conforme a Figura 66. Esse conjunto é posto dentro de uma caixa metálica de material PEC (*Perfect Conductor*) e os espaços internos são “preenchidos” com vácuo, essas são definições utilizadas pelo software, para a simplificação das condições de contorno da solução.

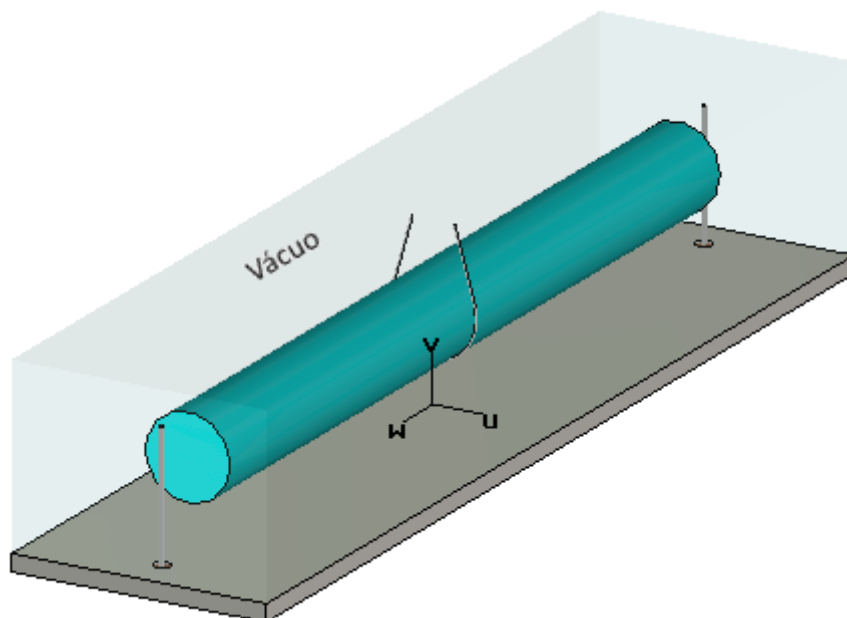


Figura 66 - Detector posicionado acima do plano de terra e entre as portas de excitação.

A Figura 67 exibe as principais cotas paramétricas em vista superior destacando a distância relativa das portas de excitação do detector ($dfacedt$).

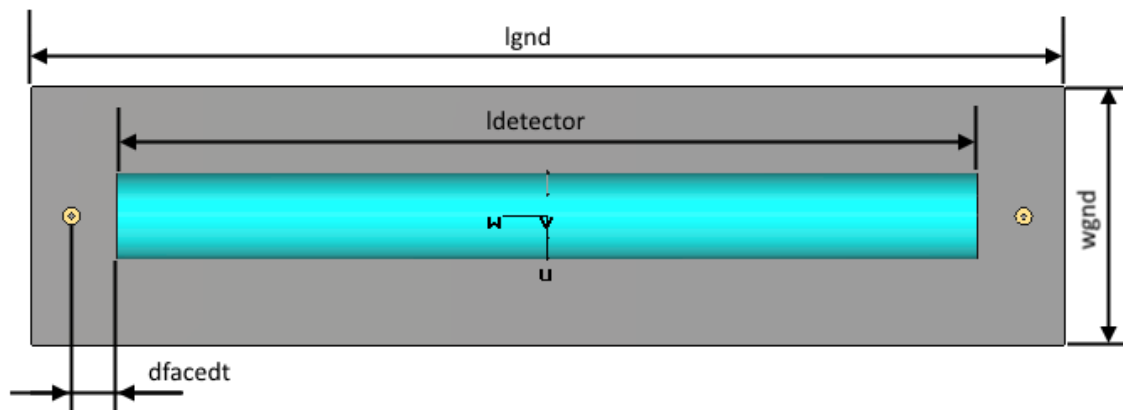


Figura 67 - Principais parâmetros de cotas em vista superior.

A Figura 68 exibe as cotas paramétricas em vista frontal destacando as medidas da altura da guia de onda da porta de excitação (h_{guia}), a distância do dielétrico em relação ao plano de terra (distgnddt) e a altura do plano de terra (h_{gnd}).

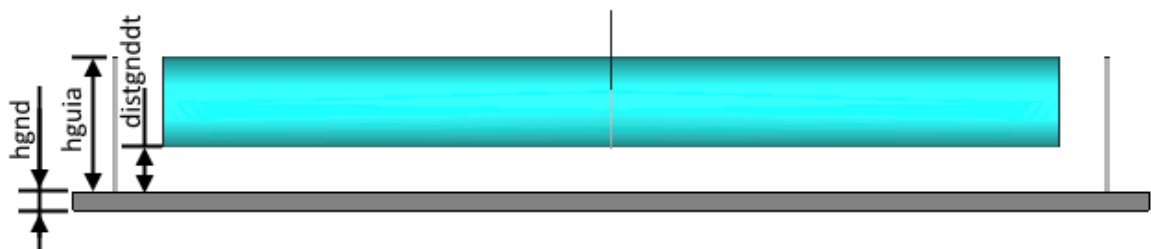


Figura 68 - Principais parâmetros de cotas em vista frontal.

O cabo coaxial utilizado para a excitação é um cabo padrão com dielétrico de raio de 2 mm (rdiecoax , permissividade elétrica relativa $\epsilon_r = 2.4$, permeabilidade magnética $\mu_r = 1$) (SYSTEMS, 2015), e o fio com raio de $0,625\text{ mm}$ (rguia , PEC) e optou-se por posicioná-lo a uma altura relativa a borda superior (h_{guia}) do dielétrico do detector (cilindro de safira). A Figura 69 exibe a posição das cotas paramétricas utilizadas para a modelagem 3D do cabo utilizado na porta de excitação.

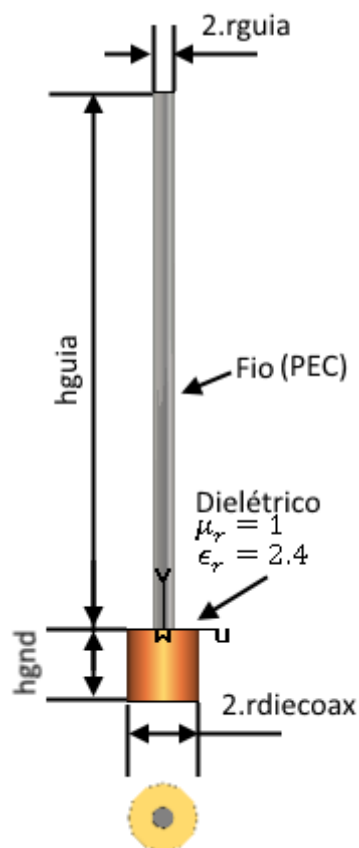


Figura 69 - Cotas paramétricas utilizadas para modelagem do cabo coaxial utilizado na excitação.

Cada porta de excitação estará fixa abaixo do plano de terra conectada ao cabo coaxial à área formada pelo dielétrico e pelo fio do cabo coaxial, essa é a área de acesso elétrico aos elementos do filtro elétrico formado por toda a estrutura. São duas portas (Figura 65), uma em cada cabo (Figura 69) que fará a excitação da peça de safira. Essa excitação é realizada apenas utilizando um dos modos elétricos de cada porta. A Figura 70 exibe o posicionamento da porta em um dos cabos na zona de acesso na parte de baixo do plano de terra.

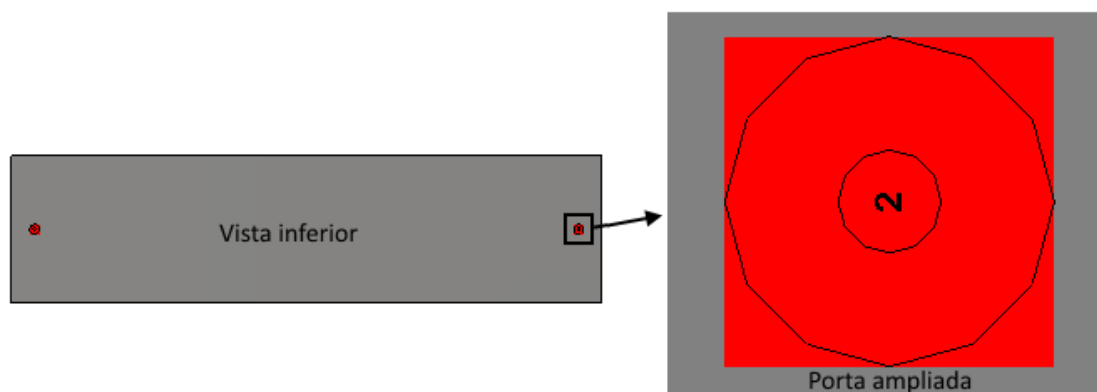


Figura 70 - Destaque da vista inferior do plano de terra e o posicionamento das portas.

Há uma parametrização (*Modeling-Translate-Transform-Scale*) que permitirá calcular a mudança de posição do modo ressonante elétrico quando ocorre uma deformação no comprimento da peça de safira; essa parametrização visa estabelecer um parâmetro que controla a deformação no comprimento da peça, simulando assim a deformação causada por uma excitação mecânica e, dessa forma, calcular a sensibilidade da transdução elétrica. O parâmetro “ztransform” é somado a um e dá um fator multiplicador da escala do comprimento, dessa forma se “ztransform” vale 0,1 então o comprimento da peça é aumentado em 10%.

O Quadro 9 possui a definição de todos os valores ajustados nos parâmetros das cotas especificadas nos desenhos da simulação elétrica. Todos esses valores foram estipulados baseando-se na possibilidade de construção física do protótipo. O interesse aqui é levantar a resposta em frequência da estrutura elétrica desenhada partindo dessas dimensões atribuídas. A análise da resposta em frequência da estrutura construída possibilitará a otimização dos parâmetros das cotas e das especificações dos materiais.

Quadro 9 – Ajustes dos valores das cotas paramétricas utilizadas no modelo e suas descrições.		
Parâmetro	Valor [mm]	Descrição
dfacedt	10	Distância entre as faces da guia e do detector
distgnddt	10	Distância entre o plano de terra e o detector
hgnd	4	Altura do plano de terra
lgnd	240	Comprimento do plano de terra
wgnd	60	Largura do plano de terra
hguia	30	Altura do fio do cabo coaxial
rdiecoax	2	Raio do dielétrico do cabo coaxial
rguia	0.625	Raio do fio do cabo coaxial
ztransform	0	Operação de escala aplicada ao eixo do comprimento do detector

4.2 MATERIAIS UTILIZADOS

São utilizados na simulação quatro materiais distintos que serão atribuídos aos sólidos que compõe a planta de excitação e o detector de safira.

4.2.1 PERFECT CONDUCTOR (PEC)

Esse material é definido previamente pelo MWS, como um material padrão para simplificação do modelo, esse material é atribuído ao fio da guia de onda, à suspensão, ao plano de terra e ao plano de fundo (*Background*) que servirá como uma caixa metálica para o modelo de excitação.

4.2.2 VÁCUO (VACUUM)

Esse material é utilizado na modelagem para “preencher” os espaços vagos entre a caixa de metal e seus elementos internos, o sentido de “preencher” é o de atribuir as propriedades físicas do vácuo nas regiões ocas do conjunto. Esse material também é previamente definido pelo software.

4.2.3 POLIETILENO SÓLIDO

Este material deve ser definido com uma permissividade relativa (ϵ_r) igual a 2,4, ele é aplicado ao dielétrico do cabo (*Times Microwave Systems* ©, 2015).

4.2.4 SAFIRA (Al_2O_3 , PURE SAPPHIRE)

Este material deve ser definido com uma permissividade relativa (ϵ_r) igual a 11.5 e coeficiente de perdas eletromagnéticas tangentes (*loss tan δ*) iguais a 6.10^{-8} (BRAGINSKY et al., 1987).

4.3 SOLUÇÃO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA (*FREQUENCY DOMAIN SOLVER*)

Quando se assume uma dependência harmônica dos campos de excitação, as Equações de Maxwell podem ser transformadas no domínio da frequência. Os campos então passam a ser descritos por fasores onde a parte real representa o fator no tempo (CST Studio Suite Help, 2014):

$$\vec{E}(t) = \Re\{\vec{E}(\omega) \cdot e^{j\omega t}\} \quad (14)$$

O MWS possui um solucionador de problemas de campo no domínio da frequência, onde é possível estabelecer a banda de trabalho e levantar a resposta em frequência através de Parâmetros de Espalhamento de Quadripólo, denominado *Scatering Parameter* (*S-Parameter*).

4.3.1 S-PARAMETER

Através do *S-Parameter* é possível determinar em uma faixa de frequências todas as frequências de ressonância do sistema, bastando para isso determinar as frequências através da análise de picos nos gráficos de resposta em frequência. Como são utilizadas duas portas

de excitação, há quatro parâmetros a serem calculados onde se deve determinar a resposta em frequência das reflexões, da transmissão direta ou da realimentação. Os parâmetros que envolvem reflexão permitem definir os modos ressonantes elétricos, pois quando ocorre atenuação do sinal eletromagnético no excitador-captor é porque há a excitação de um de seus modos ressonantes. A seguir os parâmetros são destacados:

S_{11} : A Porta 1 sendo utilizada como excitador e captor de onda;

S_{12} : A Porta 1 sendo utilizada como excitador com sinal de transmissão direta à Porta 2 (a Porta 2 se comporta como captor);

S_{21} : A Porta 2 sendo utilizada como excitador com sinal de transmissão direta à Porta 1 (a Porta 1 se comporta como captor);

S_{22} : A Porta 2 sendo utilizada como excitador e captor de onda;

Dada a simetria do problema são redundantes os parâmetros S_{11} e S_{22} e também os parâmetros S_{12} e S_{21} .

4.3.2 AJUSTE DOS PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Essa etapa consiste nos ajustes necessários para a obtenção da frequência central de uma banda de frequências com o maior QE.

4.3.2.1 BANDA DE ESTUDO

Pretende-se excitar a peça dentro da faixa de frequência entre 10 GHz e 10,1 GHz que é a faixa de frequência estabelecida em (BRAGINSKY et al., 1987), para validar os dados ajustados como parâmetros nos materiais. Para que possa ter flexibilidade na execução de cálculos já que será investigado um modo com o maior QE, optou-se por uma largura de banda de estudo entre 10 GHz e 11 GHz, esse ajuste nada interfere na simulação dentro da banda de excitação, pois o MWS irá realizar cálculos dentro da largura de banda de interesse.

4.3.2.2 DISCRETIZAÇÃO (MALHA)

Diferente do ANSYS ® o MWS possui menos configurações de malha, há apenas dois tipos de elementos o hexaédrico e o tetraédrico, mas possui um modo automático de geração

de malha chamado *Adaptative Mesh* que serve para gerar uma malha com elementos exclusivamente hexaédricos ou tetraédricos, esse método realiza o refinamento da malha utilizando critérios de convergência baseados em erro numérico, o refinamento é realizado até que o critério de convergência seja alcançado.

Inicialmente a escolha dos critérios manuais de geração da malha pode convergir ou não para resultados satisfatórios, a escolha do método *Adaptative Mesh* realiza a convergência automática de configurações, porém, demanda um grande recurso computacional.

Para realizar-se a criação da malha de elementos optou-se, pelo formato hexaédrico e pelos critérios de geração manual de malha. As configurações globais são apresentadas na Figura 71, que a princípio poderia ou não convergir para cálculos com erros aceitáveis, mas que durante a simulação se mostrou funcional:

Maximum cell

Near to model: Far from model:

Cells per wavelength: 2 2

☐ Use same setting as near to model

Cells per max model box edge 2 1

☐ Use same setting as near to model

Minimum cell

Fraction of maximum cell near to model 20

☒ Use same setting in all three directions

Figura 71 - Ajustes manuais de geração de malha: longe do modelo (*Far from Model*) é gerado de uma a duas células por comprimento de onda enquanto perto do modelo são utilizadas sempre duas células (elementos).

Após a execução do refinamento pode-se observar na Figura 72 os dados estatísticos da criação da malha:

Statistics	
Smallest cell:	Nx:
1.33333	7
Largest cell:	Ny:
6.66667	14
Number of cells:	Nz:
4,836	63

Figura 72 - Dados Estatísticos da criação da malha onde: *Small cell* (Tamanho da menor célula), *Largest cell* (Tamanho da maior célula), *Number of cells* (Número de células), N_x , N_y , N_z (Número de linhas respectivamente no eixo x, y e z).

A malha utilizada para o refinamento ficou então conforme a Figura 73:

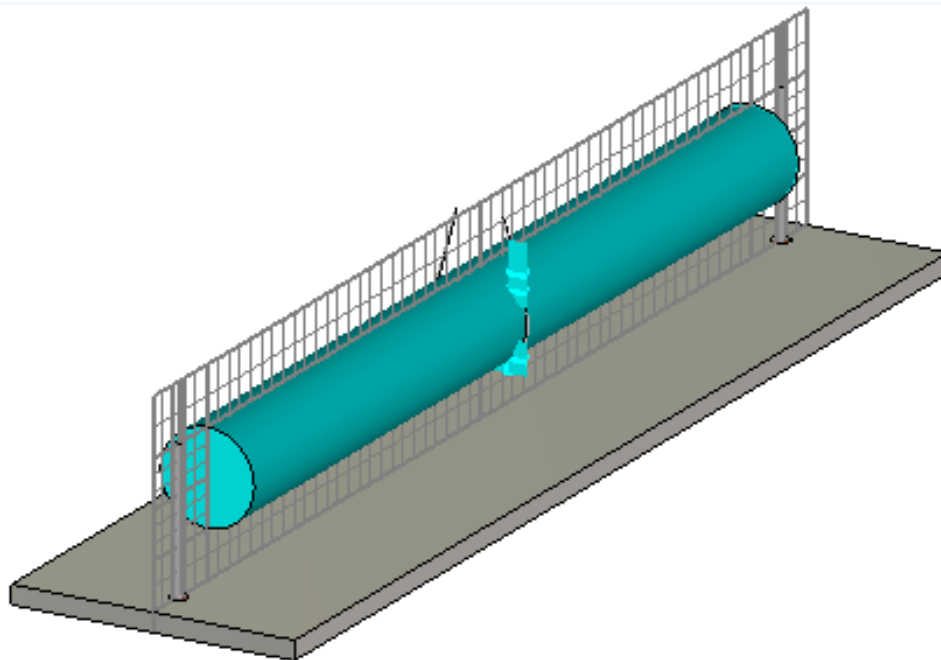


Figura 73 – Finalização manual da malha.

4.3.2.3 DEFININDO AS CONDIÇÕES DE CONTORNO

Um dos ajustes das condições de contorno é o material utilizado no *Background*, deve-se atribuir o PEC colocado a uma distância 0 mm limitada pelo *Bounding Box* (uma caixa fictícia que delimita a zona de construção dos desenhos em todas as direções). Esse ajuste permite estabelecer uma caixa blindada e aterrada em todas as direções.

As condições de contorno (*Boundaries Condition*) consistem em estabelecer os parâmetros de simetria, a fim de se realizar um número reduzido de cálculos. Como o

problema a ser resolvido envolve uma simetria em dois eixos, apenas metade dos cálculos da estrutura precisam ser realizados, para isso o menu *Simulation-Boundaries* guarda as opções que foram ajustas e são apresentadas na Figura 74.

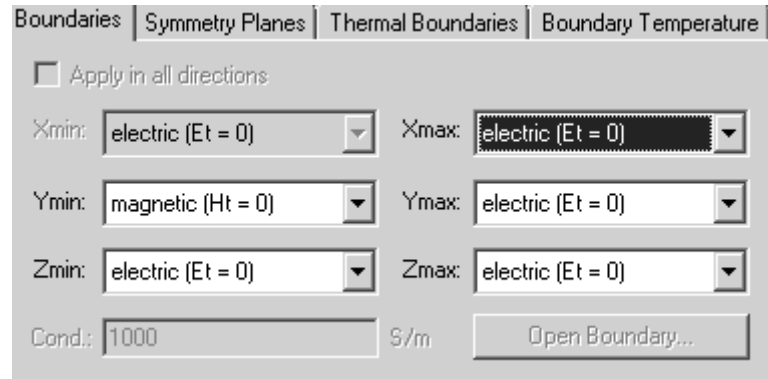


Figura 74 - Condições de contorno ajustadas.

Como a caixa deve ser blindada, o campo elétrico tangente ao entorno da caixa deve ser nulo ($\vec{E}t = \vec{0} V/m$), já como a fonte de sinal eletromagnético se propaga a partir da base do plano de terra, o plano de terra é a referência de campo magnético nulo ($\vec{H}t = \vec{0} A/m$).

Como o problema é simétrico em duas direções e o campo magnético é perpendicular ao campo elétrico quando estão se propagando ($\vec{E} \cdot \vec{H} = 0$), isso implica que a região central da *Bounding Box* (na direção de propagação Porta 1 para Porta 2, e vice-versa) deve satisfazer a condição de campo magnético nulo também ($\vec{H}t = \vec{0} A/m$) e como não será realizado o estudo da influência da temperatura nos materiais envolvidos na modelagem do protótipo, os campos envolvidos não sofrem alterações devido às variações de temperatura (sistema adiabático, sem mudanças de temperatura, $dQ = 0$). A Figura 75 e a Figura 76 exibe as condições de contorno posicionadas no *Bounding Box*.

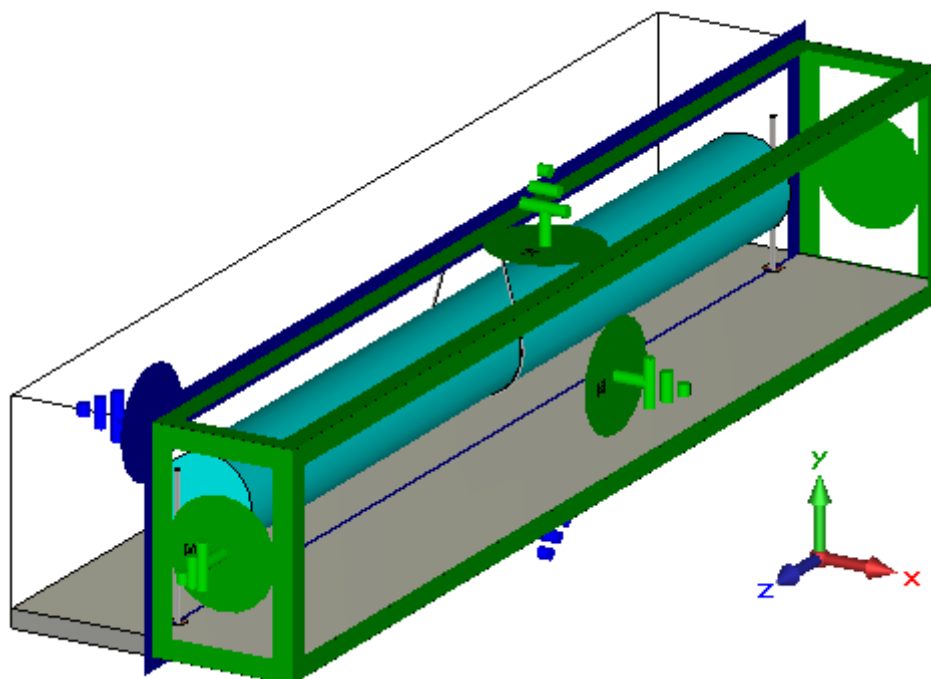


Figura 75 – Perspectiva isométrica das condições de contorno posicionadas no *Bounding Box*

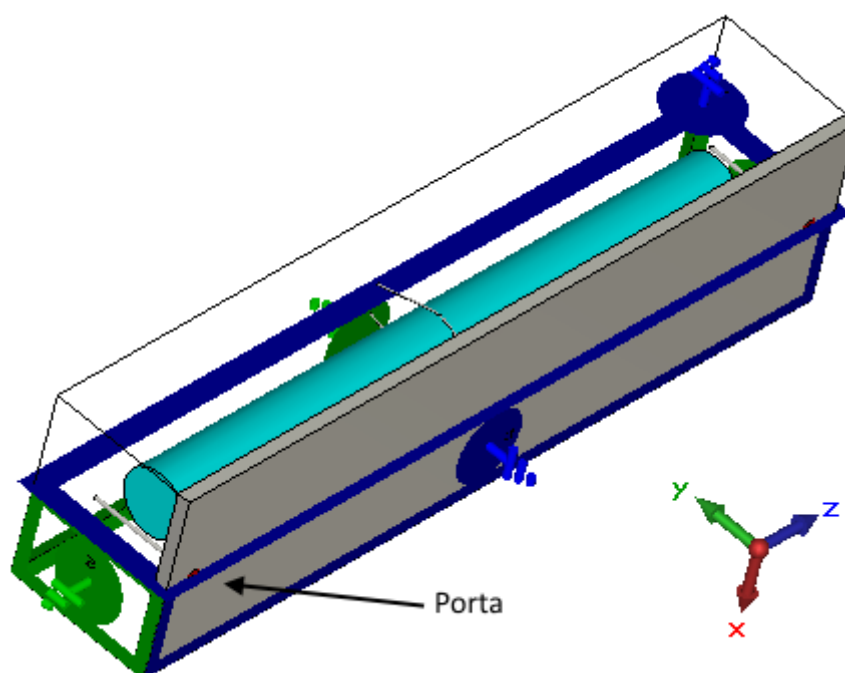


Figura 76 - Visão em perspectiva da parte inferior da *Bounding Box* exibindo a condição de contorno no plano de terra.

4.3.3 INVESTIGANDO OS MODOS ELÉTRICOS E A RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

Após o ajuste da malha deve-se investigar a resposta em frequência da banda entre 10 GHz e 10.1 GHz, para isso, na opção *Simulation-Setup Solver* define-se as amostras de

frequência (*samples*) com incrementos automáticos (*Type: Automatic*) (Figura 77), dessa forma o número de amostras é incrementado até que o critério de erro para o *S-Parameter* seja atendido, esse critério é ajustado também nessa configuração em *Method-Properties* (Figura 78). Em seguida deve ser conduzido um estudo dos modos mais seletivos e o cálculo de seu QE.

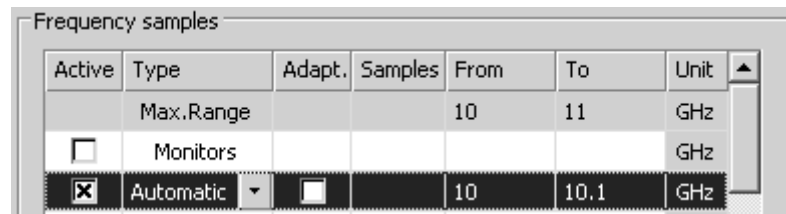


Figura 77 - Ajuste automático das amostras de frequência. Observar o campo Samples em branco.

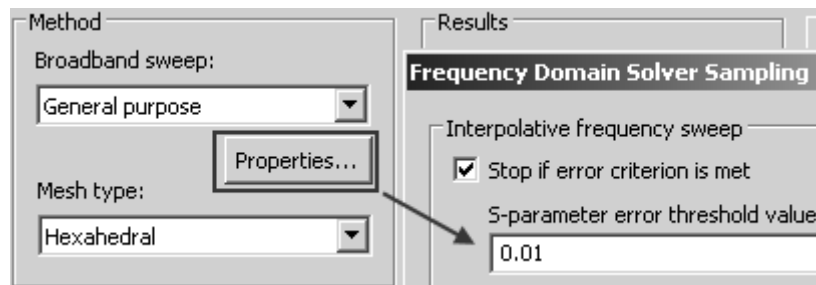


Figura 78 - Ajuste padrão para o método de convergência dos *S-Parameter*.

4.3.3.1 RESPOSTA EM FREQUÊNCIA NA BANDA DE 10 GHz A 10.1 GHz

Após a execução da simulação obtiveram-se os gráficos dos *S-Parameter's* apresentados na Figura 79, Figura 80, Figura 81 e Figura 82. Pode-se notar que as Figura 79 e Figura 82, e as figuras Figura 80 e Figura 81, são iguais, devido a simetria do problema.

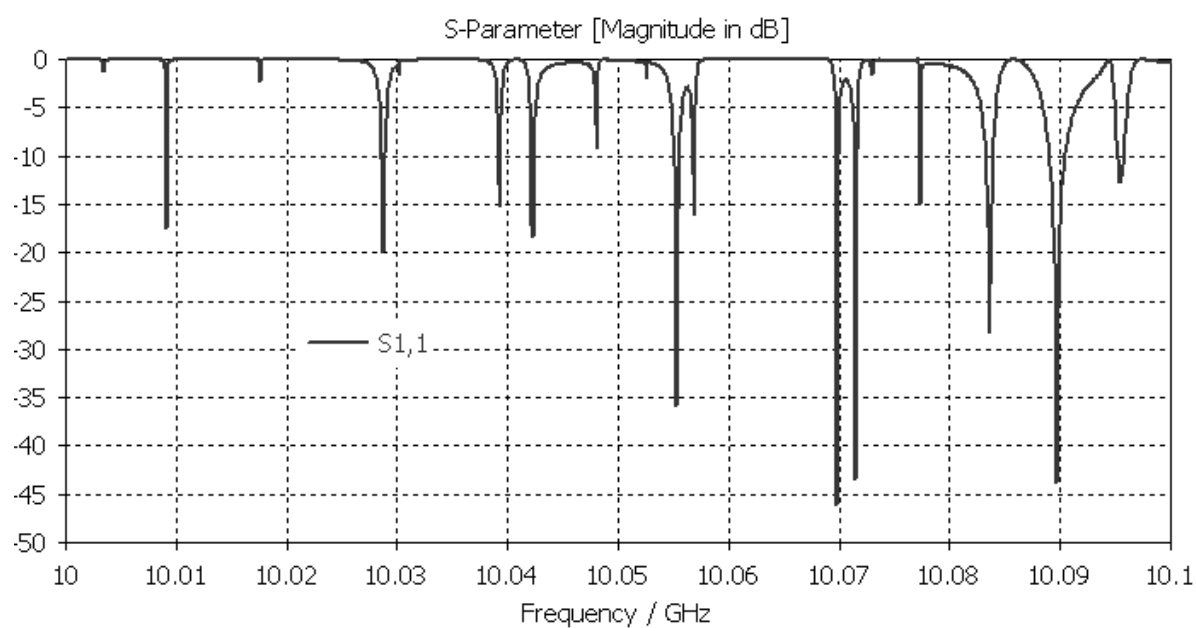


Figura 79 - *S-Paramenter*, S_{11} .

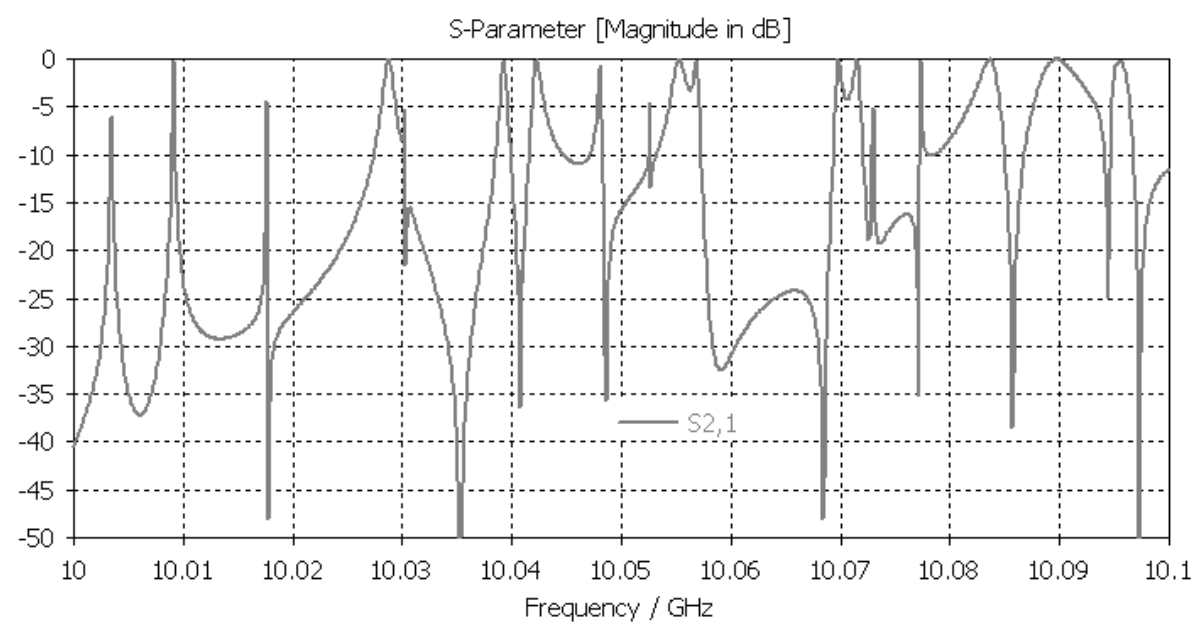


Figura 80 - *S-Paramenter*, S_{21} .

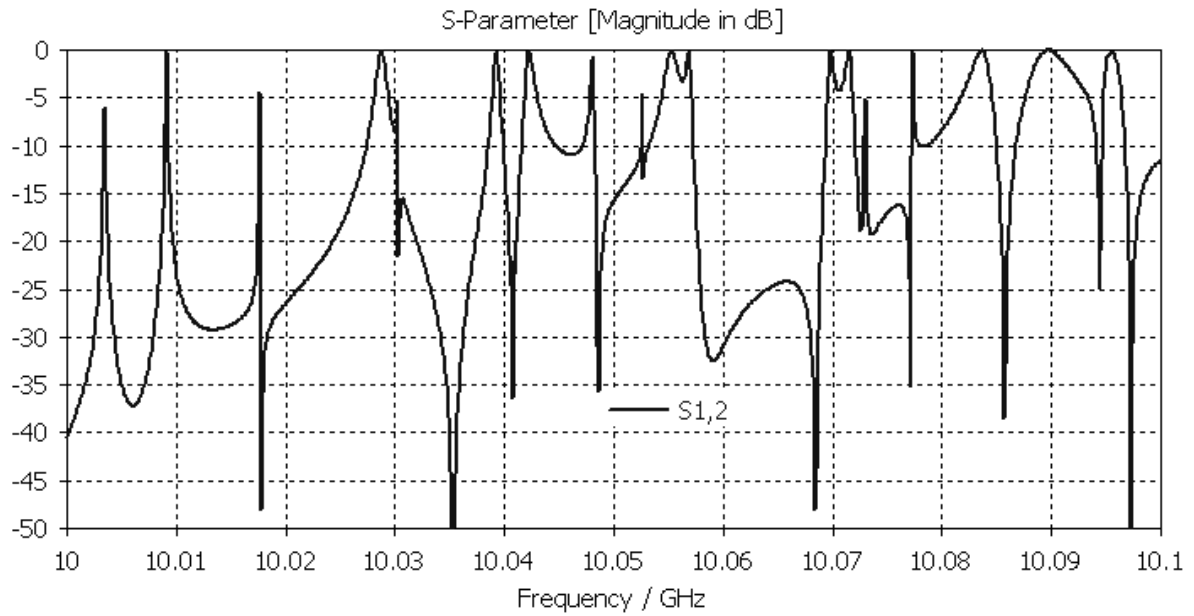


Figura 81 - *S-Parameter*, S_{12} .

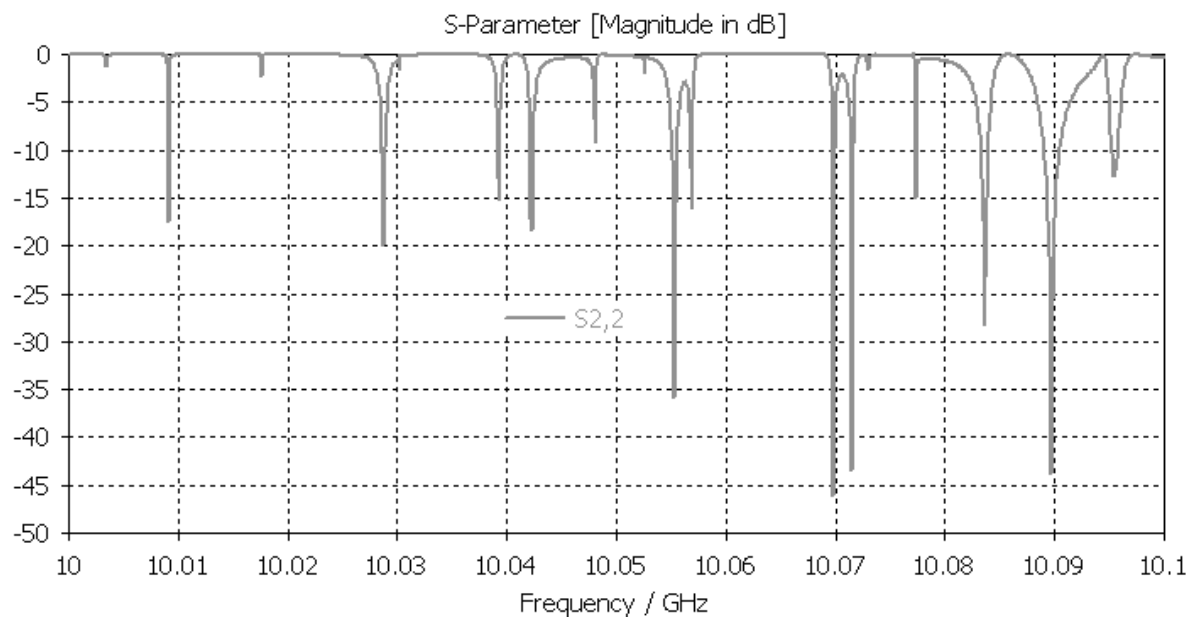


Figura 82 - *S-Parameter*, S_{22} .

4.3.3.2 ANALISANDO OS ENTORNOS DE DOIS MODOS E SEUS RESPECTIVOS QE

O primeiro modo a ser analisado encontra-se em torno de 10.01 GHz . Para se determinar a banda desse modo aplica-se zoom no gráfico e realiza-se o refinamento da simulação em torno dessa banda. O gráfico apresentado na Figura 83 exibe a banda entre $10,006 \text{ GHz}$ e $10,0012 \text{ GHz}$ e a frequência central do modo de 10.009108 GHz .

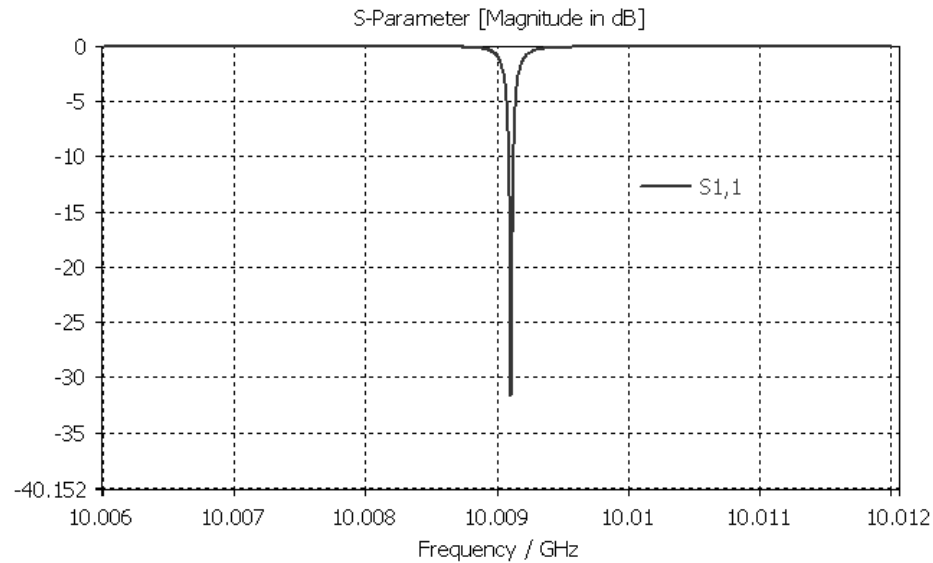


Figura 83 - Reposta em frequência do parâmetro de reflexão da Porta 1 numa faixa entre 10,006 GHz e 10,012 GHz, frequência central desse modo é de 10.009108 GHz.

Sabendo a posição do modo pode-se colocar um monitor de campo elétrico e campo magnético (*Field Monitor*) nessa frequência para se visualizar o modo de propagação dos campos elétrico e magnético e calcular automaticamente através de Pós-Processamento (*Post Precessing*) o QE (o caminho do menu de opções é: *Post Precessing - Template Based Post Processing - 2D and 3D Fields Results – Loss and Q Value From H Monitor Results – Escolhe-se o monitor na frequência de estudo*).

Após a análise o QE em 10.009108 GHz obtido foi de 787768.

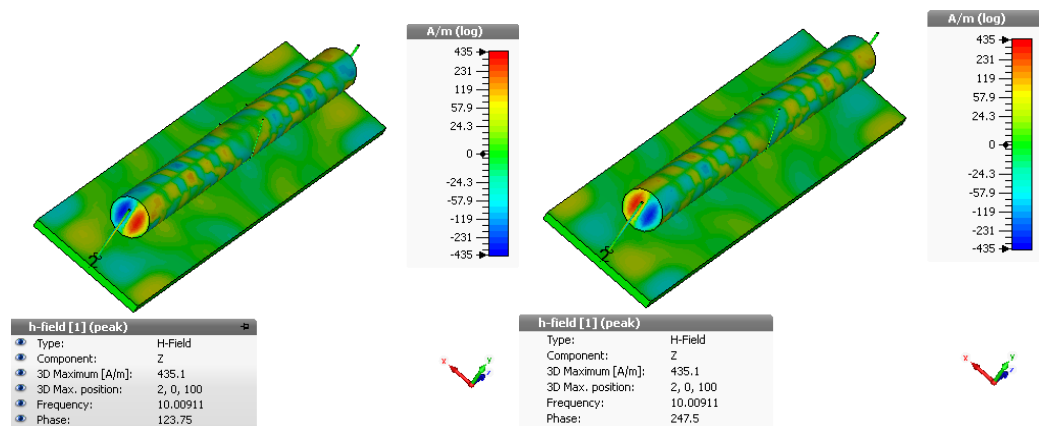


Figura 84 – Amplitude do campo magnético no eixo z Porta 1 a Porta 2, na frequência de 10.00911 GHz.

O ensaio deve ser repetido agora na banda de frequência em torno de 10,0423 GHz. O gráfico da Figura 85 exibe o resultado da simulação. E a Figura 86 exibe o gradiente de cores que representa a amplitude do campo magnético na peça de safira.

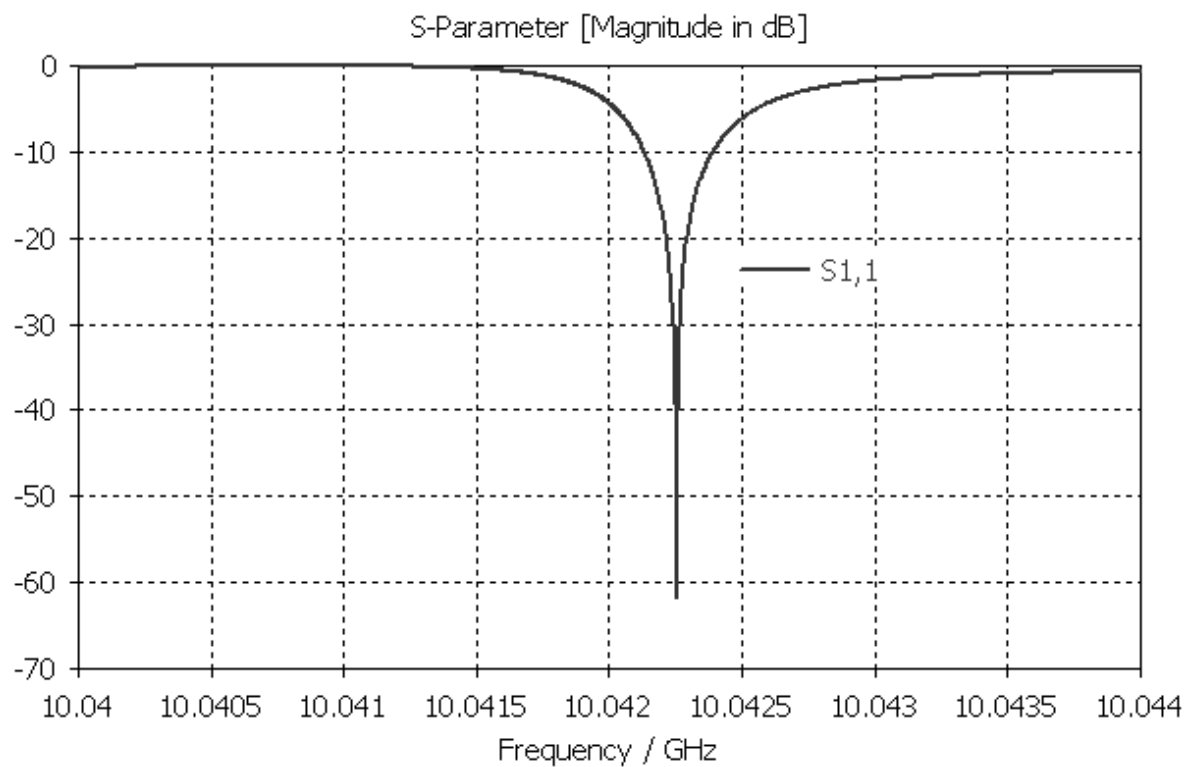


Figura 85 - Resposta em frequência em torno da 10,0423 GHz.

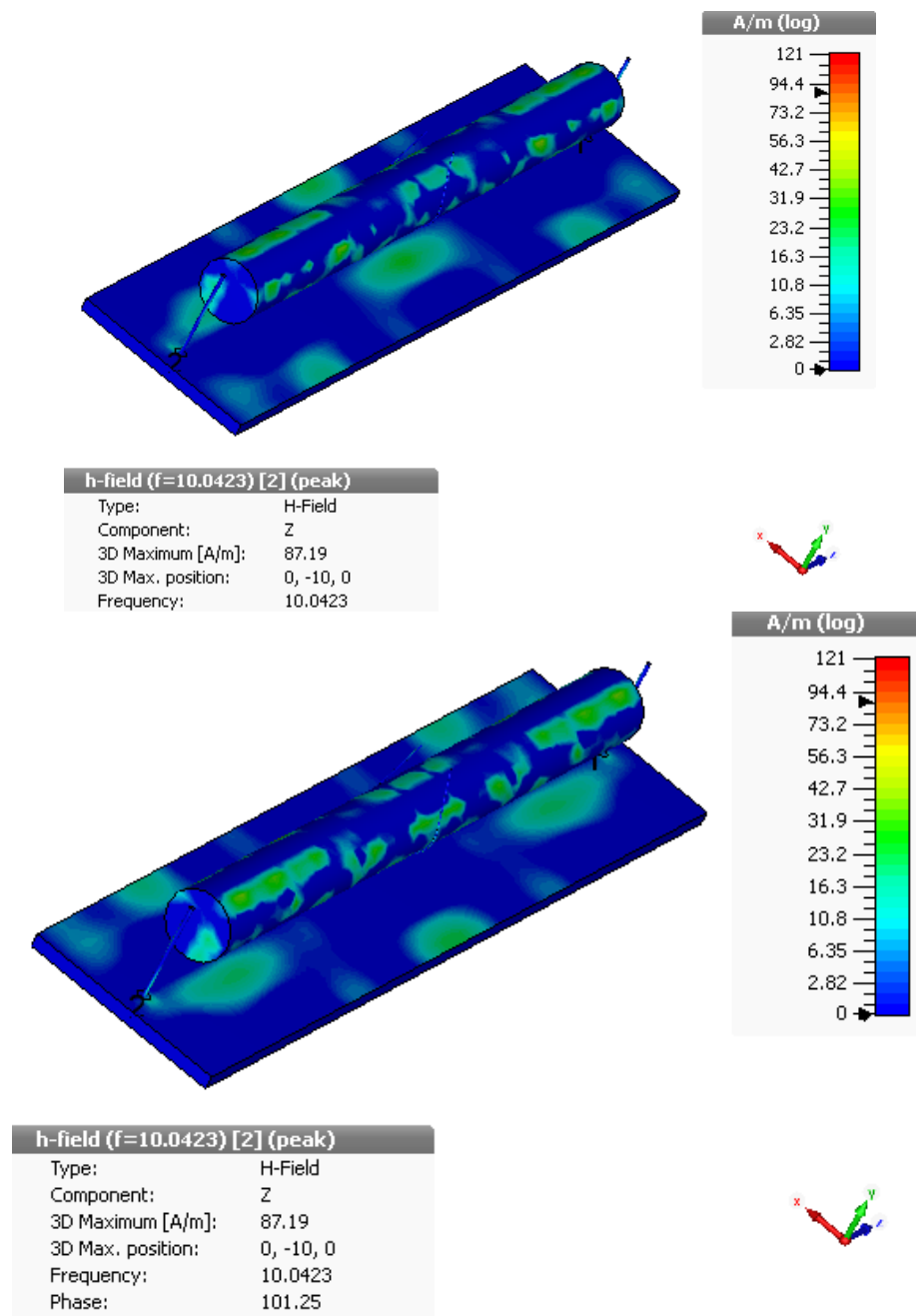


Figura 86 – Amplitude do campo magnético no eixo z Porta 1 a Porta 2, na frequência de 10,0423 GHz em dois instantes diferentes.

Após a análise, o QE em 10,0423 GHz obtido foi de 553045.

Ficou assim definido então que a frequência de excitação de interesse é aquela que apresenta o maior QE o que significa que a frequência do modo da planta que melhor se adequa às nossas necessidades é àquela em que a frequência central ficou em 10.009108 GHz.

4.4 SIMULAÇÃO DA EXCITAÇÃO MECÂNICA

A deformação no comprimento da peça será tal que não modifique de forma significativa o volume final da peça, de forma a garantir um infinitésimo de deformação.

O parâmetro *ztransform* é utilizado para aplicar escala ao comprimento do detector. Para simular a deformação mecânica será aplicada em passos operações de escala na dimensão do comprimento do detector.

4.4.1 PARAMETER SWEEP

A análise paramétrica denominada *Parameter Sweep* irá modificar o parâmetro *ztransform* em uma lista de valores incrementados em passos, a cada passo incrementado uma nova análise no domínio da frequência é realizada e a nova posição central da banda de frequência é calculada, para isso é necessário definir no *Post Processing* a obtenção dos *S-Parameters* de reflexão que será executado a cada passo de incremento de *ztransform*. Na Figura 87 está em destaque a configuração dos passos a serem utilizados na simulação. Nessa configuração o parâmetro *ztransform* será percorrido pelos valores 0 e 0.00001 que significa que o cilindro de safira irá aumentar seu comprimento final para 200.002 mm.

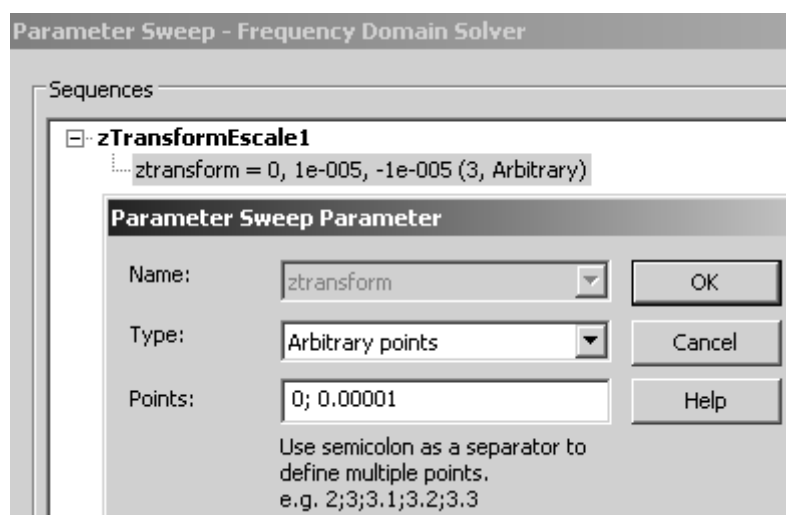


Figura 87 - Configuração do *Parameter Sweep* para uma lista de dois valores para *ztransform*.

Após a execução do procedimento *Parameter Sweep* obteve-se o gráfico apresentado na Figura 88.

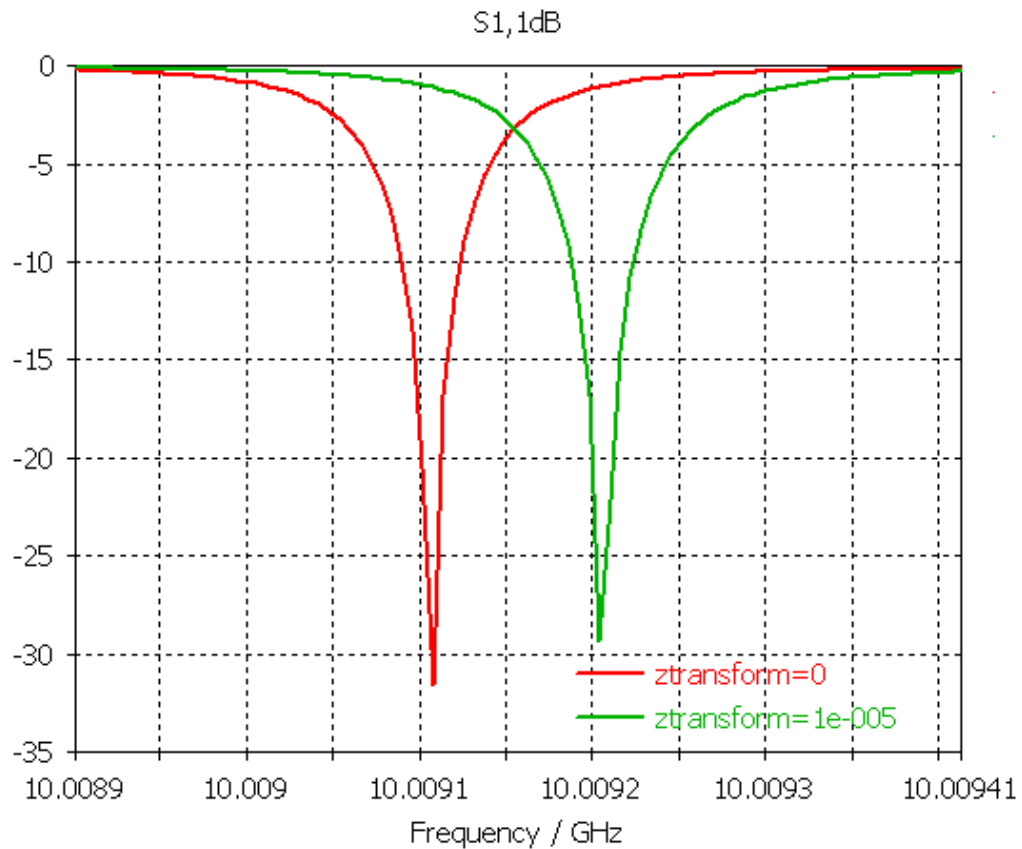


Figura 88 - Mudança de posição da frequência central devido à variação no comprimento do detector.

Analisando a Figura 88 pode-se determinar a posição das frequências centrais que estão reunidas no Quadro 10:

Quadro 10 – Variação dos parâmetros de simulação e da frequência central.	
Comprimento [L, mm]	f_c [GHz]
200	10.009108
200,002	10.009204

5 CÁLCULOS DE SENSIBILIDADE E RUÍDOS

Com os dados obtidos nos ensaios de simulação elétrica e mecânica é possível se determinar a sensibilidade do detector e as interferências no comprimento causadas pelo ruído térmico de Nyquist.

5.1 SENSIBILIDADE ÀS VARIAÇÕES NO COMPRIMENTO DO DETECTOR

A resposta em frequência do detector ao sinal eletromagnético é a de um filtro rejeita faixa cuja posição da frequência central é sensível às variações de seu comprimento, mudando de posição.

É possível se calcular a resposta da sensibilidade às variações do comprimento da safira através de (15) (BRAGINSKY, 1987):

$$S_{sL} = \frac{df_c}{dL} \quad (15)$$

Onde:

S_{sL} : Sensibilidade às variações no comprimento do detector

$\frac{df_c}{dL}$: Taxa de variação da frequência em função das variações do comprimento

Para uma deformação do comprimento pequena pode-se reescrever (15) na forma (16):

$$S_{sL} \cong \frac{\Delta f_c}{\Delta L} \quad (16)$$

Onde:

S_{sL} : Sensibilidade do detector às variações no comprimento para a faixa de frequência em torno de 10.09108 GHz

Δf_c : Variação da frequência central da resposta em frequência elétrica do filtro

ΔL : Variação do comprimento do detector

Partindo dos dados obtidos através do Quadro 10 é possível se calcular a sensibilidade da resposta em frequência elétrica em relação às variações no comprimento, dada por (17):

$$S_{sL} = \frac{0.000096 \times 10^9}{0.002 \times 10^{-3}}$$

$$S_{sL} = 48 \times 10^9 \text{ Hz/m} \quad (17)$$

5.2 CÁLCULO DA INCERTEZA DO LIMITE QUÂNTICO PADRÃO

Após o desenvolvimento do transdutor alguns fatores limitantes devem ser levados em consideração, são variáveis que interferem no comprimento do detector e causam incertezas nas medidas, portanto, esses efeitos devem ser minimizados.

As variações no comprimento causadas pelos ruídos externos e internos do sistema devem ser minimizadas para satisfazer o princípio de incerteza de Heisenberg para o SQL (*Standard Quantum Limit*) (Δx_{SQL})

O princípio da incerteza de Heisenberg estabelece o limite de deformação mínima necessária para que um sinal mecânico possa ser detectável através do transdutor elétrico.

A variação mínima no comprimento do transdutor para que o limite quântico padrão deva ser satisfeito, estabelece também que as variações causadas pelos ruídos internos e externos do sistema sejam levadas a valores de incerteza abaixo do limite quântico padrão.

Dessa forma, satisfazendo que as condições de incerteza causadas por interferências externas ou internas do sistema sejam minimizadas, tem-se que a excitação mecânica causada pelo Gerador de Sinais Gravitacionais de Maré seja suficientemente grande para que não implique uma incerteza abaixo da estipulada pelo limite de detecção, mesmo sob condições minimizadas de ruído.

Para um oscilador harmônico a incerteza de posição é dada por (18) (BRAGINSKY, 1987):

$$\Delta x_{SQL} = \sqrt{\frac{\hbar}{2 \times m_{eff} \times \omega_m}} \quad (18)$$

Onde:

Δx_{SQL} : Incerteza de posição (menor deformação possível no corpo do detector para que ocorra detecção)

\hbar : Constante de Plank Reduzida ($1.0545718001391 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \times \text{kg} \times \text{s}^{-1}$)

m_{eff} : Massa efetiva do detector (0.24944 kg)

ω_m : Modo natural do detector (27191.23589 Hz)

De modo que para o detector aqui desenvolvido tem-se (19):

$$\Delta x_{SQL} = \sqrt{\frac{1.0545718001391 \times 10^{-34}}{2 \times 0.24944 \times 27191.23589}}$$

$$\Delta x_{SQL} = 8.8170957369287 \times 10^{-20} \text{ m} \quad (19)$$

5.3 CÁLCULO DA INCERTEZA DEVIDO ÀS VARIAÇÕES TÉRMICAS (RUÍDO DE NYQUIST)

As variações no comprimento do detector devido aos efeitos térmicos (Δx_T) devem ser reduzidas abaixo de limites quânticos.

As variações no comprimento do detector devido ao acréscimo de energia térmica causam um ruído conhecido por Ruído Térmico de Nyquist, essas variações no comprimento são dadas por (20) (BRAGINSKY, 1987):

$$\Delta x_T = \sqrt{\frac{k \times T}{2 \times m_{eff} \times \omega_m \times Q_m \times B_{wD}}} \quad (20)$$

Onde:

Δx_T : Variações no comprimento do detector devido aos efeitos térmicos

k : Constante de Boltzman ($1.38064852 \times 10^{-23} J/K$)

T : Temperatura do detector ($4 K$)

m_{eff} : Massa efetiva do detector ($0.24944 kg$)

ω_m : Modo natural do detector ($27191.23589 Hz$)

Q_m : índice de qualidade mecânica do detector (8.24×10^{11})

B_{wD} : Largura da banda de detecção ($33.33 nHz$)

Dessa forma (21):

$$\Delta x_T = \sqrt{\frac{1.38064852 \times 10^{-23} \times 4}{2 \times 0.24944 \times 2 \times \pi \times 27191.23589 \times 8.24 \times 10^{11} \times 33.33 \times 10^{-9}}}$$

$$\Delta x_T = 1.5359880756656 \times 10^{-16} m \quad (21)$$

5.4 MINIMIZAÇÃO DOS EFEITOS TÉRMICOS DE NYQUIST

A relação entre o limite quântico padrão e o Ruído Térmico de Nyquist deve ser maximizada.

Para que o ruído térmico não cause perturbações significativas a taxa a seguir (22) deve tender a 1 (BRAGINSKY, 1987):

$$\frac{\Delta x_{SQL}}{\Delta x_T} = \sqrt{\frac{\hbar \cdot Q_m \cdot B_w}{k \cdot T}} \quad (22)$$

O ruído térmico deve ser pequeno o suficiente ao ponto em que os limites imposto pelo projeto seja apenas àqueles relacionados ao limite quântico. Dessa forma é garantida a maior precisão do sistema.

Assim resfriando-se a peça a 4 K o ruído térmico de Nyquist é reduzido e garante-se (23):

$$\frac{\Delta x_{SQL}}{\Delta x_T} = \frac{8.8170957369287 \times 10^{-20}}{1.5359880756656 \times 10^{-16}}$$

$$\frac{\Delta x_{SQL}}{\Delta x_T} = 0.0005740341267 \text{ m} \quad (23)$$

5.5 SENSIBILIDADE AO ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS

O ruído de fase presente no sinal eletromagnético gerado pelo gerador de sinais de micro-ondas prejudica o sistema de detecção, pois no espectro de frequência do sinal elétrico aparecerão bandas laterais, isso faz com que esse fator seja limitante na detecção, (FURTADO, 2009). Para minimizar esse problema o sinal mecânico detectado deveria possuir uma amplitude maior no espectro de frequências para se destacar frente a esse ruído de fase.

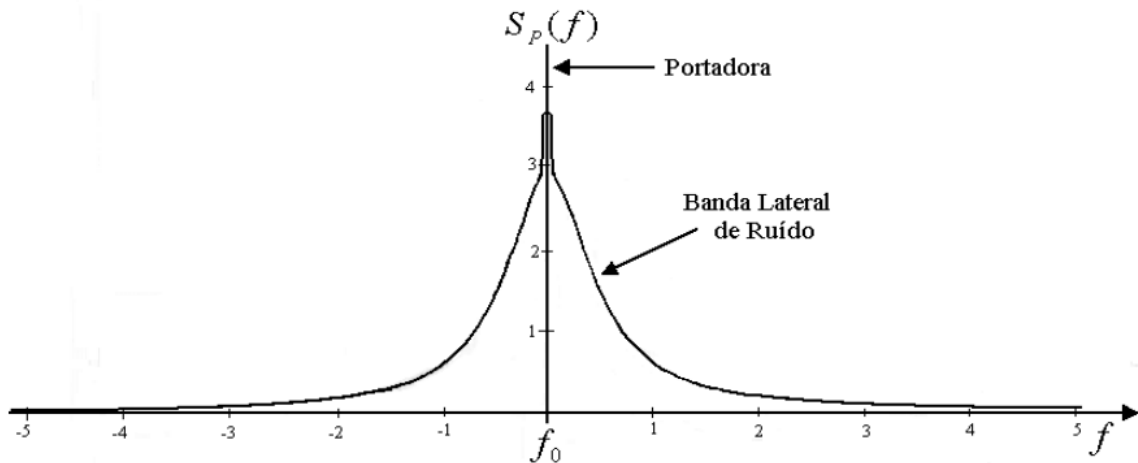


Figura 89 - Densidade espectral de potência das bandas laterais do ruído numa portadora de frequência f_0 em função da frequência de Fourier f . Fonte: (ANDRADE, 2004)

Dessa forma, para a minimização desse ruído, a única solução é o emprego de osciladores com ultra-baixo ruído de fase (FURTADO, 2009) como elemento principal dos geradores de sinais de micro-ondas.

A equação (24) apresenta a sensibilidade espectral apresentada pelo detector quando exposto ao ruído de fase do gerador de sinais de micro-ondas (BRAGINSKY, 1987):

$$\sqrt{S_x} = \left(\frac{df_c}{dL} \right)^{-1} \times \sqrt{S_\Phi} \times f_c \quad (24)$$

Onde:

S_x : Sensibilidade espectral do detector

$\frac{df_c}{dL}$: Representa a sensibilidade da frequência do filtro às deformações no comprimento do detector

S_Φ : Ruído de fase apresentado pelo gerador de sinais de micro-ondas

f_c : Frequência central da banda de frequências do filtro

Estudos já realizados sugerem que o uso de um gerador de micro-ondas utilizando um oscilador com S_Φ (ruído de fase) de -160 dBc/Hz seria suficiente para atingir o limite quântico de sensibilidade para o detector NIOBE da “University of Western Australia” (UWA) (LINTHORPE ET AL., 1994; SOLOMONSON, 1994).

Substituindo a equação (15) em (24), em seguida aplicando a aproximação (16) e isolando S_x podemos calcular aproximadamente a Sensibilidade Espectral do detector por (25):

$$S_x \cong \left(\frac{\Delta f_c}{\Delta L} \right)^{-2} \times S_\Phi \times f_c^2 \quad (25)$$

Logo temos que S_x vale:

$$S_x \cong (48 \times 10^9)^{-2} \times 10^{-16,0} \times (10.009108 \times 10^9)^2$$

$$S_x \cong 4.3506231713176 \times 10^{-18} \sqrt{\text{Hz}} \quad (26)$$

6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS

Foi projetado um Transdutor De Safira Para Medição Da Velocidade Da Interação Gravitacional, aplicando-se o Método dos Elementos Finitos e o Método das Diferenças Finitas do Domínio da Frequência para análise da resposta em frequência Mecânica e Elétrica.

A análise dos modos naturais de vibração do detector permite estabelecer em qual frequência ocorre o modo de vibrar que melhor acopla os sinais gravitacionais de maré periódicos. O modo de vibrar axial é o melhor modo de estudo de excitação para uma barra cilíndrica de safira, pois a natureza dos sinais gravitacionais de maré periódicos causa uma deformação no comprimento do detector, ao comprimi-lo e estendê-lo, fazendo-o oscilar.

A aplicação do modo de vibrar axial, além de permitir que na frequência de ressonância a peça vibre, permite que aconteça uma amplificação do sinal de excitação mecânico dado a natureza da ressonância mecânica, isso permite que amplificadores mecânicos não precisem ser utilizados, pois na frequência de ressonância a peça de safira do detector sofre grandes deformações que são utilizadas para a realização da transdução paramétrica.

A Safira (Al_2O_3) mostrou-se um ótimo material para o desenvolvimento do detector devido ao grande Q mecânico e Q elétrico obtidos através de sua aplicação, e são poucos os materiais apresentados em estudos que possuem características como essas. Essas características possibilitaram a simulação de um detector com grande sensibilidade devido ao alto grau de sintonia apresentada por ela em seus modos de vibrar e modos elétricos.

O alto grau de seletividade apresentado pela safira a possibilita ser empregada na construção do transdutor sem a necessidade de circuitos adicionais ou que possam vir a causar pequenas interferências como os amplificadores elétricos e mecânicos, isso porque ao se aplicar a safira como detector e ao mesmo tempo como o elemento transdutor do sistema, incorre na não necessidade de inserção de outros elementos que viessem a contribuir com mais variáveis aleatórias diminuindo a precisão nas medidas realizadas pelo detector, dessa forma, a safira sendo aplicada como elemento detector e transdutor, possibilitam além da redução de variáveis aleatórias a amplificação elétrica e mecânica natural dada as características de ressonância desse Material.

A análise da resposta em frequência do detector a esforços mecânicos axiais permite a observação da ação dos modos em relação à amplitude das deformações do detector, isso possibilita prever ações de dimensionamento para o refinamento da resposta em frequência.

A análise da resposta em frequência elétrica do cilindro de safira possibilitou avaliar o alto Q elétrico apresentado pela estrutura, mostrando a safira como um elemento cuja resposta em frequência apresenta o comportamento de um filtro altamente seletivo. Essa análise também possibilitou averiguar o reposicionamento da frequência central da resposta elétrica desse filtro quando uma deformação mecânica causada por um sinal gravitacional de maré periódico distorcia o eixo axial do detector, esse reposicionamento da frequência central da resposta em frequência é que possibilita a transdução paramétrica do sinal gravitacional de maré periódico.

Além de a peça cilíndrica funcionar como detector para o sinal gravitacional, ela também faz parte do sistema de transdução. Sem deformação mecânica o filtro formado pelo detector e as portas de micro-ondas apresenta uma resposta em frequência com uma frequência central f_0 , fazendo com que ocorram reflexões nas portas de acesso de micro-ondas devido às características ressonantes do detector, logo, quando uma deformação atinge o eixo axial, ele sai de seu modo ressoante elétrico, isso faz com que o sinal elétrico seja modulado, essa característica é o principal elemento que compõe a transdução paramétrica.

Devido à limitação na produção de peças de safira cilíndrica ainda estar em desenvolvimento, e as técnicas existentes hoje impossibilitarem a construção de peças cilíndricas de safira maiores, fez com que o detector desenvolvido aqui fosse limitado a uma frequência de funcionamento em torno dos 27191 Hz e para o desenvolvimento de um gerador de sinais gravitacionais quanto menor for a frequência de detecção do detector é melhor, pois viabiliza a construção do gerador devido o sistema de propulsão dele ter que girar grandes massas em velocidades menores, requerendo menos energia. Logo o dimensionamento de todo o sistema de geração de sinais gravitacionais se torna mais dependente da obtenção de um detector para frequências de detecção menores.

6.1 PROPOSTAS FUTURAS

Como propostas futuras tem-se pensado sobre a aplicação de métodos de otimização numérica para redimensionar os parâmetros do detector, como por exemplo, o menor fio possível de nióbio que possa aplicar-se sem danos na suspensão.

O estudo da influência da fricção (contato) sobre os modos naturais do detector, e sobre o seu Q mecânico.

O estudo da resposta em frequência de interferências de fontes externas através do fio da suspensão.

O estudo da resposta em frequência de outras configurações de suspensão, como aplicação de uma suspensão dupla, e a sua influencia sobre os modos naturais.

O estudo da aplicação de padrões de formas geométricas cilíndricas diferentes, como a peça cilíndrica de safira com um furo no eixo axial, avaliando seu comportamento como elemento detector e transdutor de sinais gravitacionais de maré periódicos.

O levantamento da função de transferência do sistema a partir do estudo dos S-Parameter.

O desenvolvimento de um demodulador para o sistema de transdução com o objetivo de extrair a informação do sinal modulado na portadora de micro-ondas.

Referências

ABBOTT, B. P. et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. **Physical review letters**, v. 116, n. 6, p. 061102, 2016.

ADE, P. A. R. et al. Detection of B-Mode Polarization at Degree Angular Scales by BICEP2. **Physical Review Letters**, v. 112, p. 241101, jun. 2014.

ANDRADE, L. A. Desenvolvimento de um Oscilador em 10 GHz de Ultrabaixo Ruído de Fase e a Análise de seu Desempenho nos Transdutores Paramétricos do Detector de Ondas Gravitacionais Mário Schenberg. (Tese). **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**, São José dos Campos, p. 173, 2004.

BLAIR, D. G., IVANOV, E.N., TOBAR, M.E., TURNER, P. J., KANN, F. V., HENG, I.S., High sensitivity gravitational wave antenna with parametric transducer readout *Physical review letters* 74 (11), 1998.

BLAIR, D. G. et al. The Perth Niobium Resonant Mass Antenna with Microwave Parametric Transducer. In: VELLOSO, W. F. J.; AGUIAR, O. D.; MAGALHÃES, N. S. **Omnidirectional Gravitational Radiation Observatory: Proceedings of the First International Workshop**. São José dos Campos: WORLD SCIENTIFIC Publishing Co., v. 26, 1996. p. 27-38. ISBN 9810232098.

BLAIR, D. G.; TOBAR M. E. Parametric Transducers for Resonant Bar Gravitation Wave Antenna. *J.Phys.D Appl.Phys.* ; 26, 2271., 1993.

BORTOLI, F. D. S. Sistemas Vibracionais do Detector de Ondas Gravitacionais Mário Schenberg. **Tese (Doutorado em Física) - Instituto de Física, University of São Paulo, São Paulo, 2011.**, Universidade de São Paulo, Nov. 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/43/43134/tde-02052012-102802>>. Acesso em: 20 mar. 2016.

BRAGINSKY, V. B.; ILCHENKO, V. S.; BAGDASSAROV, KH. S. 1987. “Experimental observation of fundamental microwave absorption in high-quality dielectric crystals”. **Physics Letters A**, Volume 120, Issue 6, p. 300-305.

CLARK, J. SQUIDS, Brains and gravity waves. *Physical Today*, v.39, n.3, p. 36-43, Mar 1986.

DOBROVINSKAYA, E. R.; LYTVYNOV, L. A.; PISHCHIK, V. **Sapphire - Material, Manufacturing, Applications**. 1. ed. [S.l.]: Springer, 2009.

DOWSON, D. et al. (Eds.). **Wear Particles: From the Cradle to the Grave**. [S.l.]: Elsevier Science, v. 21, 1992.

EINSTEIN, A. Näherungsweise Integration der Feld Gleichungen der Gravitation. **Preuss. Akad. Wiss. Sitzungsberichte der Physikalisch-Mathematischen Klasse**, Berlin, 1916.

FURTADO, S. R. Desenvolvimento de transdutores paramétricos de alta sensibilidade para o detector de ondas gravitacionais mario schenberg. **Tese de Doutorado, 328f**, São José dos Campos, 2009.

FRAJUCA, C., RUIZ W. Controle de um dispositivo para calibração do detector Mário Schenberg. *Sinergia*, São Paulo, v. 15, n. 2, p. 91-98, abr./jun. 2014.

HULSE, R. A.; TAYLOR, J. H. Discovery of a pulsar in a binary system. **Astrophysical Journal Letter**, v. 195, n. 2, p. 51-53, Jan. 1975.

JU, L.; BLAIR, D. G.; ZHAO, C. Detection of gravitational waves. **Reports on Progress in Physics**, v. 63, n. 9, p. 1317-1427, jan. 2000.

JUNIOR, P. F., Diretrizes para o Projeto do Calibrador do Detector Mario Schenberg. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo. Orientador Prof. Dr. Carlos Frajuca. 17/12/2015, São Paulo, S.P. – 2015.

LINTHORPE, N. P. et al. Recent results from the niobium gravitational radiation antenna at the University of Western Australia. *Seventh Marcel Grossmann on General Relativity* (1994).

LOCKE, C. R., TOBAR, M. E., E IVANOV, E.N., Monolithic sapphire parametric transducer operation at cryogenic temperatures, Department of Physics of Western Australia, American Institute of Physics: 2000, vol. 71, num. 7, p. 2737-2741

LOCKE, C. R., TOBAR , M.E., IVANOV, E.N. E BLAIR, D. G., Parametric interaction of the electric and acoustic fields in a sapphire monocrystal transducer with a microwave readout, Journal of Applied Physics, 84, 6523-6527 (1998)

LOCKE, C. R.; TOBAR, M. E.; IVANOV, E. N. Properties of a monolithic sapphire parametric transducer: prospects of measuring the standard quantum limit. **Classical and Quantum Gravity**, v. 19, n. 7, p. 1877, 2002.

MATONE, L. et al. (2007). Benefits of Artificially Generated Gravity Gradients for Interferometric Gravitational-Wave Detectors. *Class.Quant.Grav.*24:2217-2230, 2007.

NAPOLEÃO, A. B. Controle de um experimento para medir a velocidade da interação gravitacional com o Detector Mário Schenberg. **Dissertação de Mestrado**, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2013.

PADOVANI, D. Desenvolvimento de um experimento para medir a velocidade da interação gravitacional. **Dissertação de Mestrado**, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2012.

PEREIRA, E. D. S. Fundos estocásticos de ondas gravitacionais gerados por buraco negros pré-galácticos. **Dissertação de Mestrado, 108f**, INPE - São José dos Campos, 2008.

PRICE, J. C. Optimal design of resonant-mass gravitational wave antenna. *Physical Review D*, v. 36, n. 12, p. 3555 - 3570, Jul. 1987.

RIBEIRO, K. L. Estudo do sistema de transdução paramétrica para detectores de ondas. **Tese de Doutorado, 128 f**, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, 2003.

RICHARD, J. P. (1984). Wide-Band Bar Detectors of Gravitational Radiation, *Phys.Rev.*, 52,165.

RICHARD, J. P. A Multimode antenna for the detection of short pulses of gravitational waves. In: Marcel Grossmann Meeting on General Relativity, 2., Trieste, 1979. Proceedings. Amsterdam: 1982. p. 1239-1244.

SOLOMONSON, N. et al. Construction and performance of a low noise inductive transducer for the Louisiana State University gravitational wave detector. **Review of scientific instrumentation**, v. 65, n. 1, p. 174-181, jan. 1994.

STEINBERG, D. J. Equation of State and Strength Properties of Selected Materials. **CA: Lawrence Livermore National Laboratory**, Livermore, 1996.

SYSTEMS, T. M. Complete Coaxial Cable Catalog & Handbook, 2015. Disponivel em: <<http://www.timesmicrowave.com/documents/resources/TL-16%20PDF%20for%20web.pdf>>. Acesso em: 20 jan. 2016.

YEE, K. S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. **IEEE Trans. Antennas Propag.**, v. 14, n. 3, p. 302-307, 1966.

WEBER, J. Gravitational-wave-detector events. **Physical Review Letters**, v. 20, n. 23, p. 1307, 1968.

WEILAND, T. A discretization method for the solution of Maxwell's equations for six-component fields. **Archiv Elektronik und Uebertragungstechnik**, v. 31, n. 3, p. 116-120, 1977.