



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

**ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE MATERIAIS**



ENG 02298 – TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO

UTILIZAÇÃO DE FIBRA DE SISAL EM CONES DE ALTO-FALANTES

**Felipe Ferreira Luz
130453**

**Professor Orientador:
Prof. Dr. Sandro Amico**

Dezembro / 2008

"Se não fossem os ossos seríamos moles"

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Marcelo A. Paranhos Luz e Oneides C. Ferreira Luz, pelo suporte dado para que eu pudesse chegar à conclusão, não somente deste trabalho, mas também a mais uma importante etapa na minha vida que foi o curso de graduação na Universidade do Rio Grande do Sul.

Aos meus irmãos e melhores amigos, Fabricio e Franco, que me apoiaram, motivaram e me deram toda ajuda necessária em todas minhas outras tarefas. Obrigado.

A minha Tia Odete M. de Melo Ferreira e minha avó Lilia de Melo Ferreira, que são minhas outras duas mães, e que com um amor incondicional sempre me ajudaram e acreditaram em mim, mesmo quando nem eu mais acreditava.

Agradeço a todos colaboradores da Eletrônica Selenium que me auxiliaram na realização deste trabalho, principalmente aos meus colegas da Engenharia de Produto. Em especial ao engenheiro Acir Ozelame, ao Professor Homero Sette, ao engenheiro Guilherme Haas e ao futuro engenheiro Marcio Lumertz Rocha.

Ao Prof. Dr. Sandro Amico pelos ensinamentos, disponibilidade e pelo comprometimento na busca dos melhores resultados.

Aos amigos e colegas, pelas alegrias e motivação para chegar tão longe, mas sempre sonhando ir além.

Por fim, agradeço a todos que estiveram comigo durante meu período de graduação e que ainda continuarão, agora, me auxiliando na busca de novos e desafiadores objetivos.

Resumo

Neste trabalho foram analisadas as propriedades mecânicas e acústicas de um modelo de alto-falante ao empregar Fibras de Sisal na composição de seu cone. Foram utilizadas diferentes quantidades desta fibra a fim de estudar o comportamento do alto-falante.

Para tanto foram criados protótipos de alto-falantes utilizando cones-teste, cones com diferentes composições. Depois, com estes alto-falantes foram realizados ensaios acústicos e mecânicos.

Por fim, empregou-se o uso de Análise por Elementos Finitos a fim de se analisar os diferentes Modos de Vibração gerados pelos cones-teste.

Ao final concluiu-se que a adição de fibras de sisal aos cones de alto-falante do modelo estuda não afetam acusticamente o produto. Porém suas propriedades mecânicas foram melhoras.

Sumário

Agradecimentos	3
Resumo	4
Lista de Figuras	6
Introdução	8
Objetivos	9
1. Revisão Bibliográfica	10
1.1. O alto-falante	10
1.1.1. Componentes de um alto-falante	11
1.1.1.1. Sistema Motor	11
1.1.1.2. Diafragma	12
1.1.1.3. Suspensão	13
1.1.2. Curva de resposta	14
1.1.3. Tipos de alto-falantes	14
1.1.4. Parâmetros de um alto-falante	17
1.1.5. Modos de Vibração do Cone	19
1.2. Materiais Compósitos e Fibras Vegetais	20
1.3. Elementos Finitos	23
2. Procedimento Experimental	25
2.1. Materiais	25
2.1.1. Seleção do alto-falante	25
2.1.2. Equipamentos	26
2.2. Métodos	27
2.2.1. Construção dos cones-teste	27
2.2.1.1. Preparação das fibras	27
2.2.1.2. Preparação da solução	29
2.2.1.3. Processo de fabricação	31
2.2.2. Montagem dos protótipos	35
2.2.3. Medições	36
2.2.3.1. Parâmetros Acústicos e Curvas de Resposta	36
2.2.3.2. Potência	38
2.2.3.3. Ensaio de DMA	38
2.2.3.4. Caracterização das Frequências de Ressonância dos Novos Materiais	39
2.2.4. Análise Computacional	40
2.2.5. Teste Auditivo	41
3. Resultados e Discussão dos Resultados	43
3.1. Parâmetros e Curvas de Resposta	43
3.2. Análise de Potência	48
3.3. Análise de DMA	50
3.4. Análise da Frequência de Ressonância	51
3.5. Análise por Elementos Finitos	52
3.6. Teste Auditivo	55
4. Conclusões	56
5. Sugestões para Futuros Trabalhos	57
Anexo I	58
6. Referências Bibliográficas	58

Lista de Figuras

Figura 01 – Componentes do alto-falante em corte.....	10
Figura 02 – Curva de Resposta do <i>Sub-Woofers</i> modelo 15SW1P.....	14
Figura 03 – Curva de Resposta do <i>Woofers</i> modelo 15PW3.....	15
Figura 04 – Curva de Resposta do Mid-Bass modelo 12MB2P.....	15
Figura 05 – Curva de Resposta do <i>Drivers</i> modelo D200.....	16
Figura 06 – Curva de Resposta do <i>Tweeters</i> modelo ST350.....	16
Figura 07 – Diferentes Modos de Vibração de um corpo.....	19
Figura 08 – Diferentes Modos de Vibração de um cone de alto-falante.....	20
Figura 09 – Curvas Tensão Deformação esquemáticas para Materiais Compósitos.....	21
Figura 10 – Composição química da fibra de sisal não-tratada.....	22
Figura 11 – <i>Woofers</i> modelo 12W8P.....	25
Figura 12 – Curva de Resposta do modelo 12W8P.....	26
Figura 13 – Equipamento Klippel Analyser 2.....	27
Figura 14 – Fibra de Sisal em forma de rolo.....	27
Figura 15 – Processo de corte das fibras.....	28
Figura 16 – Pesagem final das fibras.....	29
Figura 17 – Fibras de sisal sendo adicionados à solução.....	30
Figura 18 – Celulose sendo adicionada à solução.....	31
Figura 19 – Solução final sendo misturada.....	31
Figura 20 – Cone recebendo uma pré-forma.....	32
Figura 21 – Cone em sua forma final.....	32
Figura 22 – Aplicação da resina + tinta.....	33
Figura 23 – Esteira de aquecimento.....	33
Figura 24 – Cone final, após ter sido impregnado, pintado e seco.....	34
Figura 25 – Cone acabado como seu anel de suspensão.....	35
Figura 26 – Alto-falantes 12W8P confeccionados com o cone original.....	36
Figura 27 – Medição dos Parâmetros de Thille-Small.....	37
Figura 28 – Câmara onde realizou-se as medições das Curvas de Resposta.....	37
Figura 29 – Sala onde são realizadas as medições dos Testes de Potência.....	38
Figura 30 – Cortador gerador de corpos de prova.....	39
Figura 31 – Sistema de medição de frequência de ressonância.....	40
Figura 32 – Interface do ANSYS WORKBENCH v11.....	41
Figura 33 – Sala de Audição, onde são realizados os testes auditivos.....	42
Figura 34 – Curvas de resposta (a 1W) obtidas para os diferentes cones.....	45
Figura 35 – Comparativo entre as curvas de resposta (a 100W) utilizando os diferentes cones.....	46
Figura 36 – Curvas de Distorção Harmônica (a 1W) utilizando os diferentes cones.....	47
Figura 37 – Comparativo entre as curvas de distorção harmônica (a 100 W).....	48
Figura 38 – Gráfico da Temperatura \times Tempo gerado a partir de um Teste de Potência.....	49
Figura 39 – Comparativo entre os alto-falantes após o Teste “Quebra-Cone”.....	49
Figura 40 – Curva tensão \times deformação gerada pelo DMA.....	50
Figura 41 – Curva de deslocamento do corpo de prova com 0% de sisal.....	51
Figura 42 – Curva de deslocamento do corpo de prova com 50% de sisal.....	51
Figura 43 – Quarto modo de vibração encontrado no cone do <i>Woofers</i> 12W8P.....	54
Figura 44 – Vigésimo modo de vibração encontrado no cone do <i>Woofers</i> 12W8P.....	55
Figura 45 – 1º Modo de Vibração.....	61
Figura 46 – 2º Modo de Vibração.....	61
Figura 47 – 3º Modo de Vibração.....	62
Figura 48 – 4º Modo de Vibração.....	62
Figura 49 – 5º Modo de Vibração.....	63
Figura 50 – 6º Modo de Vibração.....	63

Figura 51 – 7º Modo de Vibração.....	64
Figura 52 – 8º Modo de Vibração.....	64
Figura 53 – 9º Modo de Vibração.....	65
Figura 54 – 10º Modo de Vibração.....	65
Figura 55 – 11º Modo de Vibração.....	66
Figura 56 – 12º Modo de Vibração.....	66
Figura 57 – 13º Modo de Vibração.....	67
Figura 58 – 14º Modo de Vibração.....	67
Figura 59 – 15º Modo de Vibração.....	68
Figura 60 – 16º Modo de Vibração.....	68
Figura 61 – 17º Modo de Vibração.....	69
Figura 62 – 18º Modo de Vibração.....	69
Figura 63 – 19º Modo de Vibração.....	70
Figura 64 – 20º Modo de Vibração.....	70

Introdução

O mercado do áudio é cada vez mais competitivo, empresas em todo mundo atuam neste amplo setor. É necessária uma constante inovação de produtos a fim de alcançar destaque perante os concorrentes. Para viabilizar isto, é cada vez mais comum o investimento de empresas nos setores de Pesquisa e Desenvolvimento em busca de novas tecnologias aplicáveis aos seus produtos. Por outro lado, a preocupação ambiental está atualmente em evidência, e é um fator importante para o desenvolvimento sustentável destas empresas.

O desenvolvimento dos materiais compósitos como campo de pesquisa, ao mesmo tempo independente e altamente interdisciplinar, trouxe muitas expectativas na Ciência dos Materiais, já que uma grande variedade de combinação de propriedades podem ser obtidas.

A aplicação desta tecnologia no mercado do áudio é direta. Diversos componentes de um alto-falante podem usufruir das singulares propriedades desta classe de materiais, além disso, ao se utilizar de fibras naturais na composição destes materiais, as empresas de áudio atingem destaque no cenário ao utilizarem produtos com componentes de fontes renováveis e não agressivas ao meio ambiente.

A partir deste trabalho, busca-se entender claramente as variáveis envolvidas com o emprego de fibras naturais na composição de cones de alto-falantes.

Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral analisar o comportamento acústico e mecânico de cones de alto-falantes confeccionados com diferentes teores de fibras de sisal.

Como objetivos específicos, pode-se citar:

- Confeção do material composto Celulose/Sisal;
- Avaliação de propriedades acústicas;
- Avaliação de propriedades mecânicas;
- Avaliação acústica utilizando a técnica de Análise por Elementos Finitos;
- Discussão dos resultados obtidos procurando associar as características do material composto (quantidade de fibra, módulo de elasticidade e resistência ao rasgo) em função de suas qualidades acústicas.

1. Revisão Bibliográfica

1.1. O alto-falante

Alto-falantes são transdutores eletrodinâmicos de graves, médios e agudos, e, segundo DICKASON (1977) se baseiam todos em um mesmo conceito: um diafragma em movimento, devido a um campo magnético modulado em amplitude, atuando em conjunto com um ímã permanente. Este mecanismo é análogo ao de um motor elétrico, sendo, no caso do alto-falante, o rotor substituído pela bobina móvel.

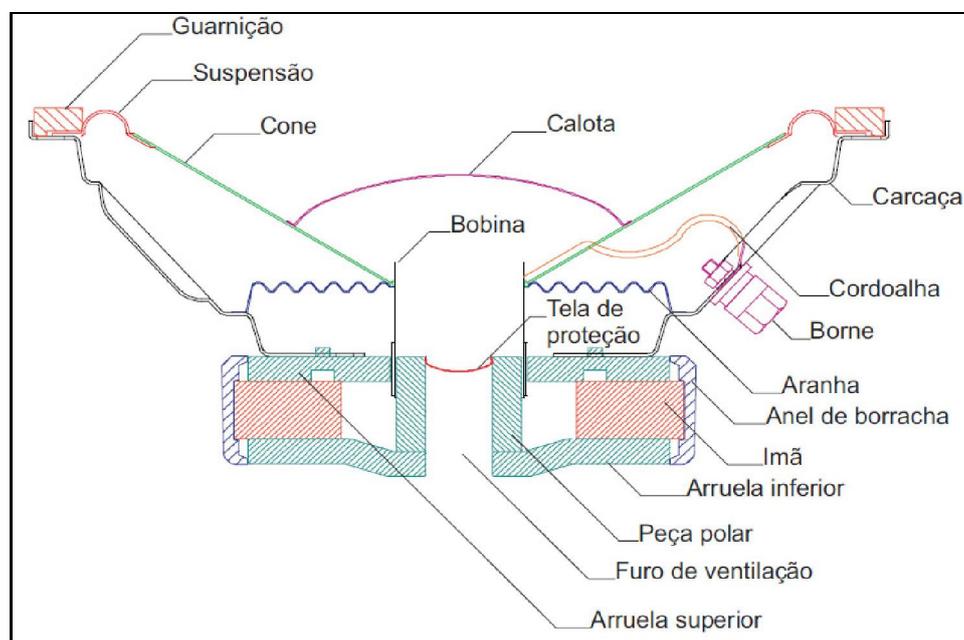


Figura 01 – Componentes do alto-falante em corte.

A Figura 01 mostra uma vista em corte de um típico alto-falante eletrodinâmico e seus componentes principais. Quando se aplica corrente à bobina móvel, um campo eletromagnético é produzido perpendicularmente ao fluxo da corrente e ao campo do ímã permanente. A força mecânica resultante obriga o diafragma (ou cone) a deslocar-se em um movimento perpendicular ao campo magnético no entreferro, movimentando o ar em ambos os lados do cone.

1.1.1. Componentes de um alto-falante

Conforme observado na Figura 01, um alto-falante é composto por diferentes materiais de diferentes classes. Em um único produto encontram-se materiais Poliméricos, Cerâmicos, Metálicos e Compósitos. Para melhor estudar estes diferentes componentes, o alto-falante é dividido em três sistemas distintos, mas interligados entre si, que representam seu funcionamento:

- Sistema Motor: composto pelo ímã, peça polar, arruela inferior, arruela superior e bobina móvel;
- Diafragma: composto pelo cone e calota;
- Suspensão: consistindo de aranha e do anel de suspensão.

1.1.1.1. Sistema Motor

O sistema motor é composto basicamente por cinco itens: arruela inferior e peça polar que, em conjunto, formam o entreferro, ímã permanente, bobina móvel e placa traseira. As arruelas superior e inferior, assim como a peça polar, são construídas de um material de alta permissividade, geralmente aço de baixo teor de carbono, e proporcionam um caminho cômodo para o fluxo magnético do ímã. O ímã, utilizado em forma de anel, é normalmente constituído de Ferrite de Bário, um material cerâmico de ótimas propriedades magnéticas.

Assim, o circuito magnético fecha-se no entreferro, produzindo um campo magnético intenso entre a peça polar e a placa frontal. BORWICK (1988) explica que, caso uma corrente alternada senoidal seja aplicada à bobina móvel, se terá um fluxo de corrente em um determinado sentido durante o semi-ciclo positivo, o que deslocará o cone em uma dada direção. Quando o fluxo de corrente se inverter durante o semi-ciclo negativo, a polaridade do campo magnético se inverterá também, obrigando o deslocamento do cone a tomar o sentido oposto, conseqüência das sucessivas atrações e repulsões dos dois campos.

1.1.1.2. Diafragma

DICKASON afirma que o som produzido por um alto-falante nada mais é do que uma turbulência ritmada no ar, causada pelo movimento do diafragma, resultado da interação do campo magnético da bobina com o do ímã permanente. Composto pelo cone e pelo domo protetor (calota), geralmente feito de papel (celulose + resina), o diafragma pode interferir significativamente na qualidade e nas características de resposta de um alto-falante.

Existem duas formas básicas de cone utilizadas em projetos de diafragmas: a cônica ou plana e a convexa. Segundo BORWICK (1988), os cones de forma cônica tendem a apresentar um elevado pico no extremo superior da faixa de resposta, sendo sua localização determinada, em parte, pelo ângulo de inclinação do cone. Comparando com a forma convexa, a banda passante é um pouco mais larga. Os cones convexos tendem a produzir uma resposta de frequência mais plana, e apenas um moderado pico na resposta de altas frequências (menos eficiência nas altas frequências), com uma ligeira redução na banda passante, em comparação com os cones planos. A resposta de frequência dos cones convexos pode ser modificada e controlada através de sua curvatura.

Atualmente outros materiais vêm sendo empregados na construção de cones de alto-falantes. Para uso em produtos de menor valor agregado, é comum a utilização de cone fabricados em Polipropileno. Já em cones para sistemas Hi-Fi (alta definição) utiliza-se cones fabricados com Fibras de Poliaramida (Kevlar®) e Fibras de Carbono.

Os domos (calotas) são responsáveis por proteger a região formada entre a bobina e a peça polar, exposta a partículas estranhas. Porém os domos também podem alterar a resposta de alta frequência do alto-falante. Como existe tendência natural do cone irradiar apenas pela área do centro as frequências mais elevadas, o domo pode desempenhar papel crítico nessa faixa, conforme o material de sua construção e forma geométrica. Domos utilizando materiais mais rígidos tendem a

produzir maiores alterações na resposta de frequência em comparação aos menos rígidos.

1.1.1.3. Suspensão

A suspensão de um alto-falante é composta por dois elementos: o anel de suspensão e a aranha. Ambos são responsáveis por um parâmetro fundamental do alto-falante, a “compliância” (este parâmetro será abordado no próximo item deste trabalho), que é, na verdade, o inverso da rigidez, e também fornecem a energia necessária para que o cone e a bobina móvel voltem aos respectivos estados de repouso. A aranha contribui com 80% da compliância do alto-falante, enquanto o anel contribui com os 20% restantes.

O anel de suspensão é geralmente feito de um material elastomérico ou compósito (resina fenólica + fibra de algodão), e possui duas funções importantes. A primeira função é ajudar a manter centrada a bobina móvel do alto-falante e a segunda, de importância fundamental, é amortecer os modos de vibração na borda externa do cone (este assunto será abordado em um próximo item deste trabalho). De acordo com DICKASON a escolha da espessura do tipo de material usado nesse anel pode alterar dramaticamente as características do alto-falante. A habilidade do anel de suspensão para amortecer vibrações, impedindo que sejam refletidas de volta ao cone, modifica tanto a amplitude como a fase nos modos de ressonância, fazendo dele um elemento importante do projeto do alto-falante e uma ferramenta eficaz para a configuração da resposta.

A aranha, normalmente feita de um compósito resina fenólica + fibra de algodão, desempenha diversas. Uma dela é manter centrada a bobina móvel no GAP (região entre a arruela superior e entreferro) e impedir a entrada de partículas estranhas no entreferro. Contudo, sua principal finalidade é proporcionar a maior parte da força restauradora (compliância) do alto-falante. É a rigidez da aranha uma das variáveis determinantes no cálculo da frequência de ressonância do alto-falante.

1.1.2. Curva de resposta

O ouvido humano é capaz de perceber freqüências de 20Hz a 20.000Hz. Uma importante ferramenta para se avaliar um alto-falante é a partir de sua Curva de Resposta, que é um gráfico de Nível de Pressão Sonora (dB) x Freqüência (f).

1.1.3. Tipos de alto-falantes

Os alto-falantes são divididos em categorias de acordo com faixa de freqüência em que atuam:

- *Sub-Woofers* – são projetados para reproduzir freqüências extremamente baixas, de 20 a 120 Hz (Figura 02). Possui borda flexível, alta excursão, freqüência de ressonância baixa e bobina com enrolamento alto.

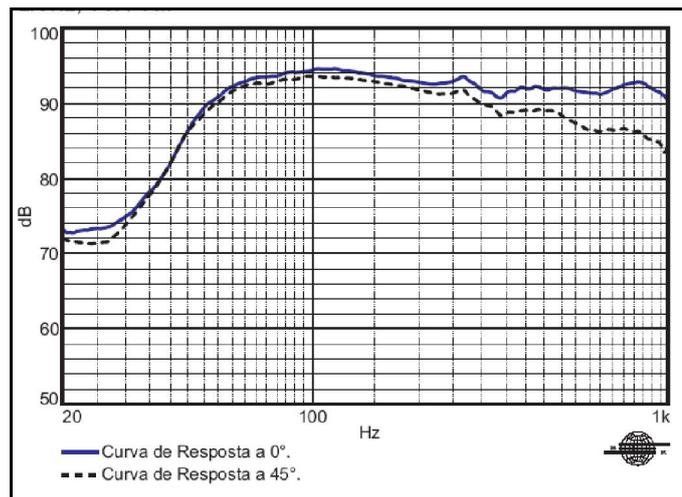


Figura 02 – Curva de Resposta do *Sub-Woofers* modelo 15SW1P.

- *Woofers* – são projetados para reproduzirem freqüências graves, de 100 a 500 Hz, a grande maioria responde até a 3.000 Hz (Figura 03). Utilizam vários tipos de borda: espuma, tecido, borracha e papel,

possui excursão média/baixa, enrolamento de bobina menor que o *Sub-Woofers*.

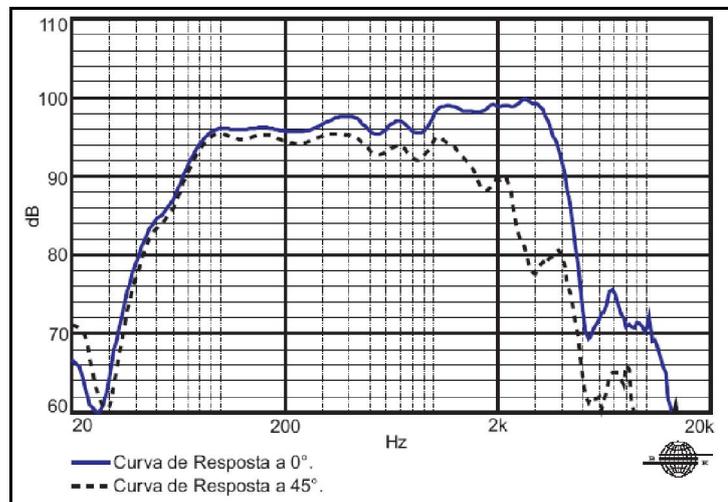


Figura 03 – Curva de Resposta do *Woofer* modelo 15PW3.

- Mid-Ranges – são projetados para responderem em frequências médias, de 250 a 50000 Hz (Figura 04).

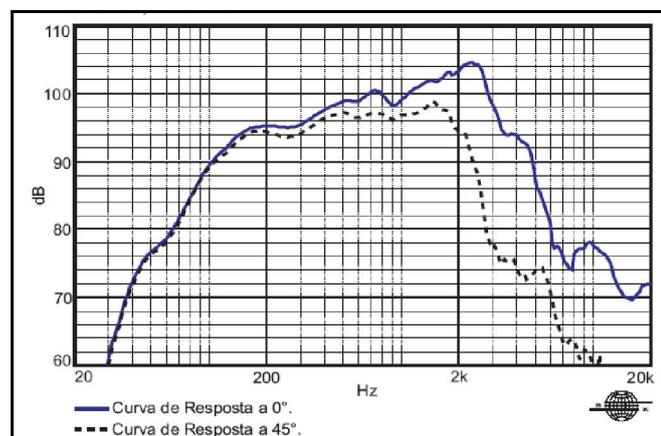


Figura 04 – Curva de Resposta do Mid-Bass modelo 12MB2P.

- *Drivers* – projetados para responder em frequências média/altas, de 1000 a 7000 Hz (Figura 05). Os *Drivers* mais atuais respondem até na

faixa de freqüência dos *Tweeters*, chegando a alcançarem respostas em 20000 Hz.

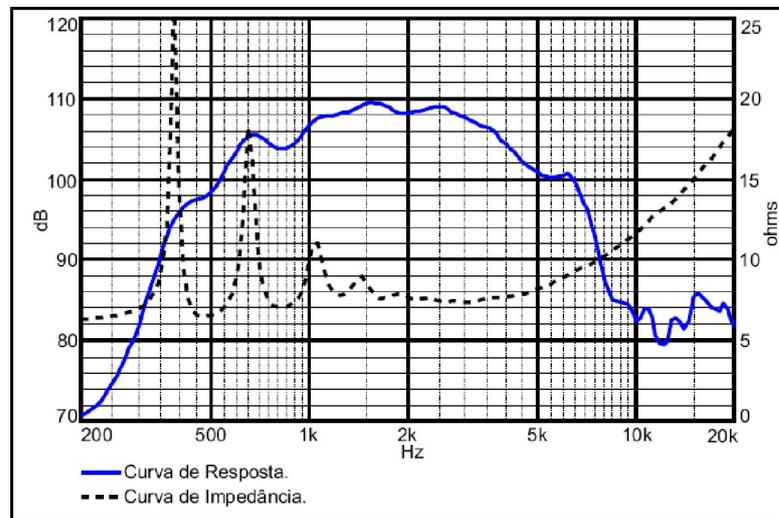


Figura 05 – Curva de Resposta do *Driver* modelo D200.

- *Tweeters* – projetados para responderem em freqüências altas, de 5000Hz a 20000Hz (Figura 06).

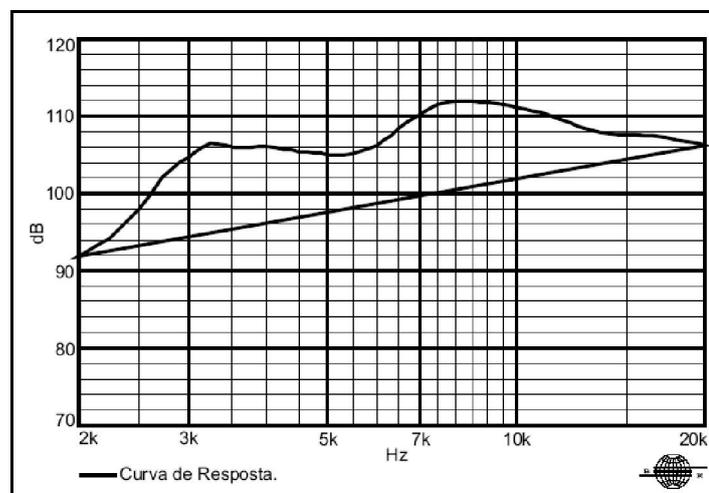


Figura 06 – Curva de Resposta do *Tweeter* modelo ST350.

1.1.4. Parâmetros de um alto-falante

Os Parâmetros Físicos de um alto-falante (listados abaixo) são fundamentais no desenvolvimento de projetos acústicos.

- **Sd** - Área projetada do diafragma, em metros quadrados.
- **Mms** - Massa do diafragma, incluindo a carga acústica, em kg.
- **Cms** - Compliância da suspensão, em metros por Newton.
- **Rms** - A resistência mecânica da suspensão em N.s/m.
- **Le** - Indutância da bobina medida em milihenries (mH).
- **RE** - Resistência DC da bobina, medida em ohms.
- **BL** - O produto da força do ímã pelo comprimento do fio (l) no campo magnético, em T.m.
- **Xmax** - Máxima excursão de pico linear do cone em mm.
- **Vas** - Volume de ar no qual um pistão de área Sd tem a mesma compliância que a suspensão do alto-falante, em metros cúbicos.

Porém, estes Parâmetros Físicos não são suficientes. Segundo SETTE (1996) até março de 1961, quando o engenheiro Neville Thiele apresentou seu trabalho "*Loudspeakers in Vented Boxes*" na *Radio and Electronics Engineering Convention*, realizada em Sidney, Austrália, o projeto de Caixas Acústicas era algo nebuloso, contraditório e envolto em profundo mistério.

Em seu trabalho Thiele apresentou um método claro e objetivo para se determinar a Curva de Resposta de um alto-falante. Mais tarde, com a ajuda do professor Richard Small, foram criados os Parâmetros de THIELE-SMALL. De acordo com SETTE (1996), estes parâmetros são, até os dias de hoje, amplamente utilizados na indústria do Áudio. Estes parâmetros são divulgados pelos fabricantes de alto-falantes e a partir deles é feito o projeto acústico para a construção de Caixas Acústicas e Sistemas de Áudio.

Os Parâmetros de THIELE-SMALL são listados abaixo:

- F_s = Frequência de ressonância:
$$F_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{M_{ms} \cdot C_{ms}}}$$
- Q_{ms} = Fator de qualidade mecânica:
$$Q_{ms} = \frac{1}{2\pi \cdot F_s \cdot C_{ms} \cdot R_{ms}}$$
- Q_{es} = Fator de qualidade elétrica:
$$Q_{es} = \frac{2\pi \cdot F_s \cdot M_{ms} \cdot R_e}{(BL)^2}$$
- Q_{ts} = Fator de qualidade total:
$$Q_{ts} = \frac{1}{\frac{1}{Q_{es}} + \frac{1}{Q_{ms}}}$$

Observa-se que o Q_{ts} é a soma paralela do Q_{ms} com o Q_{es} ($Q_{ms} // Q_{es}$). Obtendo, geralmente, um valor muito parecido com o valor do Q_{es} , já que é normalmente muito inferior ao Q_{ms} . Este parâmetro é muito importante, pois dita o fator de qualidade do alto-falante, que influi principalmente nas áreas próximas à ressonância.

O fator de qualidade pode ser facilmente entendido aplicando uma função impulso. Por exemplo, quanto maior for o fator de qualidade mais oscilações o sistema terá para voltar ao estado de repouso. Isto determina muitas características do som do alto-falante, por exemplo, para *sub-woofers* automotivos, em que agrada ao público um som mais retumbante e com mais pressão, é interessante um alto-falante com um Q_{ts} relativamente alto, em contrapartida, para um alto-falante de médio-grave, onde interessa a qualidade e a inteligibilidade, um Q_{ts} mais baixo é mais agradável. Normalmente alto-falantes profissionais têm este valor mais baixo, até para *sub-woofers*, o que faz com que o som fique mais “seco”. Estes valores variam normalmente de 0,2 a 1,6. Como este

parâmetro é praticamente controlado pelo Qes, que por sua vez tem em sua fórmula o parâmetro BL ao quadrado, fica lógico que quanto mais força o motor tiver, mais controlado será o cone.

1.1.5. Modos de Vibração do Cone

AVITABILE (1999) explica que a Análise Modal é um processo que descreve uma estrutura em termos de suas características naturais como frequência, amortecimento e modo da forma. É uma propriedade dinâmica. Ou seja, para cada frequência que um corpo é excitado, a sua estrutura é deformada. A Figura 07 exemplifica as diferentes formas que um corpo assume para responder em determinada frequência. Basicamente uma Análise Modal é o estudo das características naturais de uma estrutura. Ela é hoje empregada em projetos de Aviões, Navios, Aeronaves e até mesmo em Raquete de Tênis.

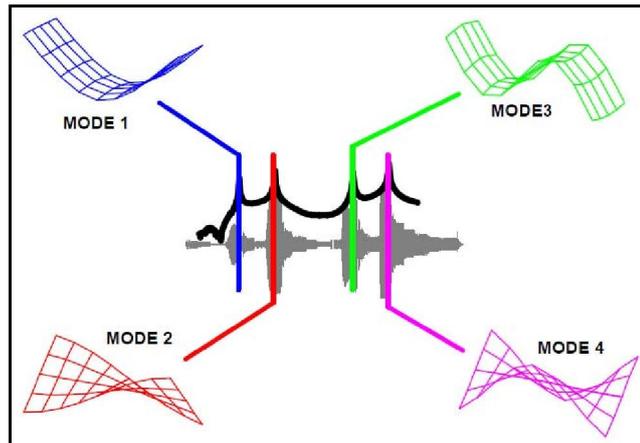


Figura 07 – Diferentes Modos de Vibração de um corpo.

O primeiro Modo de Vibração de um corpo é a sua Frequência Natural ou Frequência de Ressonância. Todo corpo possui uma Frequência de Ressonância característica. Esta frequência é afetada pela massa e pela rigidez do corpo. Quanto maior a massa do corpo menor sua Frequência de Ressonância, e quanto maior a rigidez do material, maior será a Frequência de Ressonância do corpo.

AVITABILE ainda afirma que é de fundamental importância o projetista conhecer os diferentes Modos de Vibração de um corpo para saber como a Resposta em Freqüência deste corpo será afetada. Assim, ele estará mais apto para melhor sua estrutura de acordo com o projeto.

No caso de um alto-falante, para que ele responda em determinada freqüência é necessário que o cone se deforme. Os Modos de Vibração de um cone são apresentados na Figura 08.

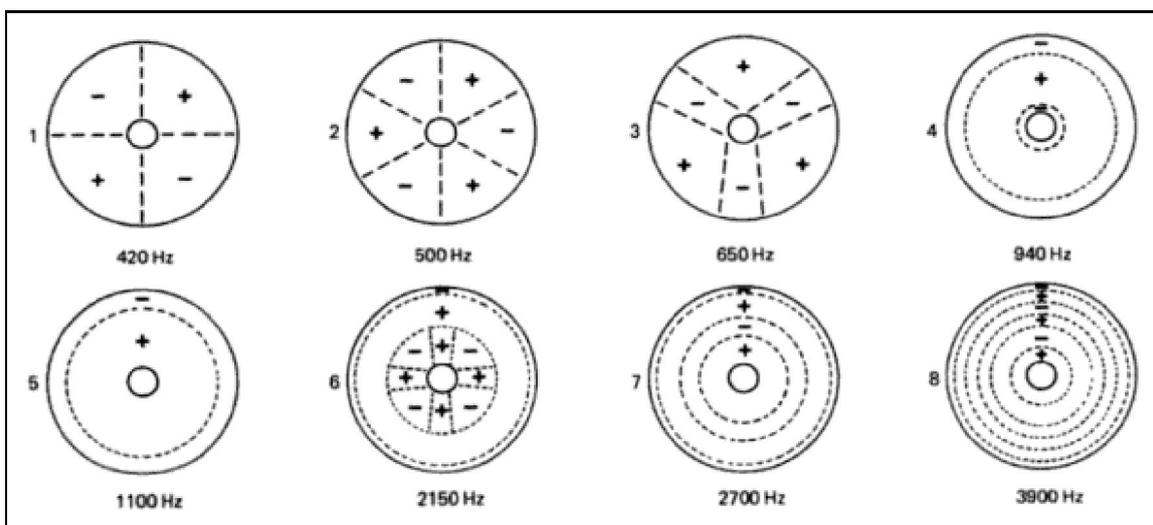


Figura 08 – Diferentes Modos de Vibração de um cone de alto-falante.

Estas diferentes formas assumidas pelo cone, para possibilitar a resposta na freqüência desejada, acaba, muitas vezes, gerando distorção na reprodução sonora. Portanto é necessário conhecer os diferentes Modos de Vibração presentes nos cones para que o projeto do alto-falante possa ser adaptado para a obtenção de melhores resultados.

1.2. Materiais Compósitos e Fibras Vegetais

Materiais Compósitos são definidos de diversas maneiras, CALLISTER (1991) diz que um compósito é considerado como sendo qualquer material

multifásico que exibe uma significativa proporção de propriedades de ambas as fases constituintes de tal maneira que uma melhor combinação de propriedades é realizada. De acordo com este princípio de ação combinada, melhores combinações de propriedades são melhor amoldadas pela judiciosa combinação de 2 ou mais distintos materiais. Barganhas de propriedades são também feitas para muitos compósitos.

Uma definição mais sucinta de PADILHA (1997) diz que os Materiais Compósitos são materiais projetados de modo a conjugar características desejáveis de dois ou mais materiais. Assim como GAY (2003) que se refere a Materiais Compósitos como materiais que possuem fibras fortes – contínuas ou não contínuas – envolvido em uma matriz de material mais fraco. A matriz serve para distribuir as fibras e transmitir a carga para as fibras.

As propriedades finais de um Material Compósito vão depender de uma série de fatores, porém principalmente do tamanho e orientação da fibra. A Figura 09 mostra curvas esquemáticas de tensão-deformação para materiais com fibra frágil e matriz dúctil, exemplificando o resultado da interação entre matriz e reforço.

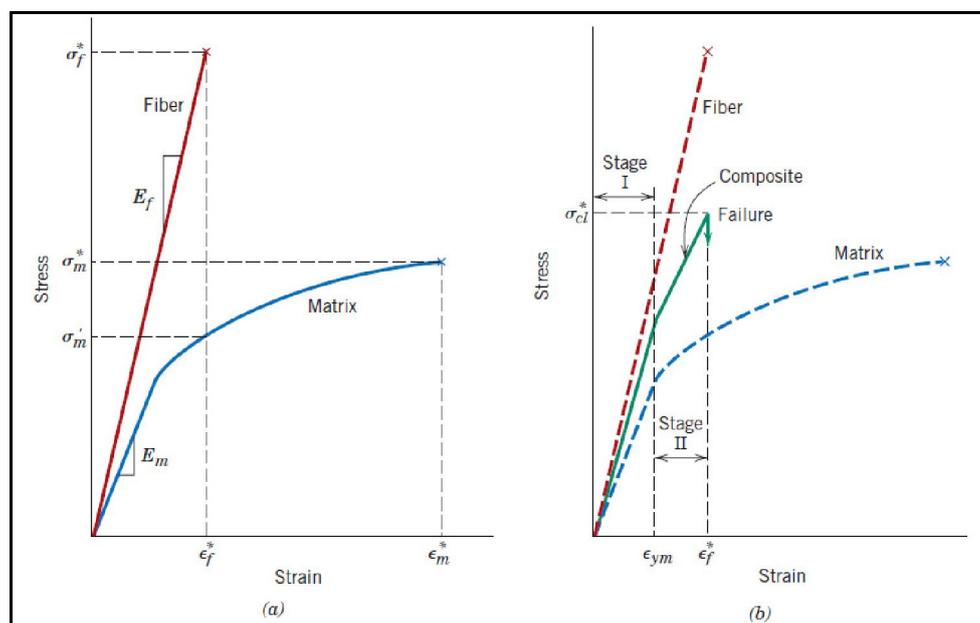


Figura 09 – Curvas Tensão Deformação esquemáticas para Materiais Compósitos.

De acordo com WAMBUA (2003) estudos demonstram que compósitos poliméricos reforçados por fibras vegetais tais como juta, sisal, abacaxi, curauá e cânhamo, entre outras, são adequadas a um grande número de aplicações e seu uso é vantajoso em termos econômicos e ecológicos.

O sisal é uma importante fibra nacional utilizada principalmente em cordoaria e artesanato, mas que pode ter seu valor agregado multiplicado se utilizado como reforço de compósitos poliméricos. Segundo GASSAN (1999) o sisal é uma fibra ligno-celulósica leve e atóxica, que apresenta alto módulo e resistência específica, custa aproximadamente dez vezes menos que a fibra de vidro e, ao contrário desta fibra inorgânica, causa menos danos por abrasão aos equipamentos e moldes. A Figura 10 apresenta a composição química da fibra de sisal não tratada.

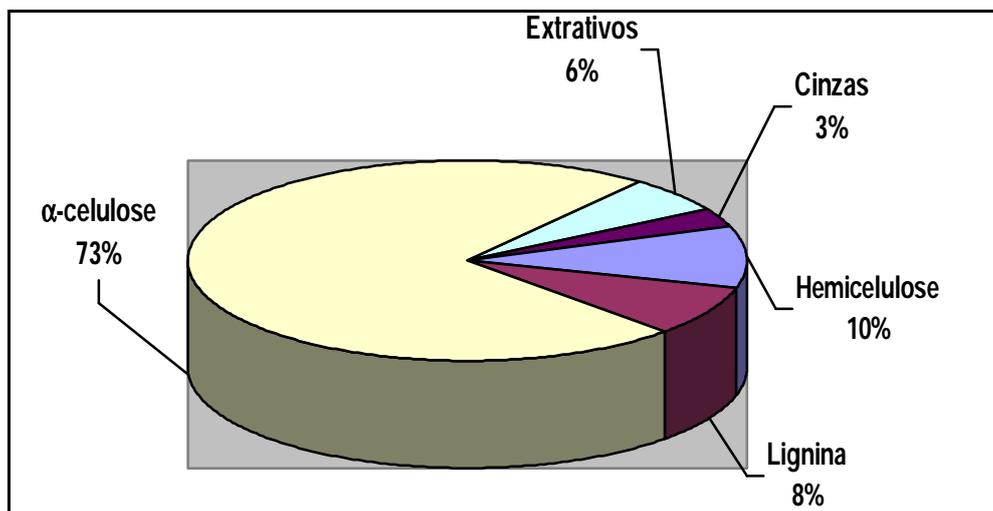


Figura 10 – Composição química da fibra de sisal não-tratada.

Entre outras vantagens do sisal, diz ANGRIZANI (2006), podemos apontar a facilidade de modificação superficial, característica das fibras vegetais, sua abundância no Brasil, facilidade de cultivo, o fato de ser um material biodegradável que provem de fonte renovável, além de apresentar boas propriedades como

isolante térmico e acústico. Estes fatores, aliados à alta tenacidade, resistência à abrasão e ao baixo custo, tornam o sisal uma das mais estudadas fibras naturais.

1.3. Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) tem suas origens nos anos 40, tendo sido entretanto vastamente utilizado apenas nos últimos 20-30 anos, graças aos avanços experimentados pelos computadores. De acordo com RADE (2005) “O MEF é uma técnica de análise numérica destinada à obtenção de soluções aproximadas de problemas regidos por equações diferenciais”. Embora o método tenha sido originalmente desenvolvido para a análise estática de sistemas estruturais, ele tem sido utilizado no estudo de uma grande variedade de problemas de Engenharia, nos domínios da Mecânica dos Sólidos, Mecânica dos Fluidos, Transmissão de Calor e Eletromagnetismo.

Devido à sua eficiência e flexibilidade, além de sua adequação à implementação em computadores digitais, o MEF tem hoje uma grande difusão tanto no meio acadêmico como no industrial, estando disponível em uma grande quantidade de softwares existentes no mercado, fato que explica a sua grande popularidade nos dias atuais.

A principal motivação para o uso do MEF reside no fato que, devido à complexidade dos problemas práticos de Engenharia, soluções analíticas em forma fechada tornam-se inviáveis ou mesmo impossíveis. Assim, devemos recorrer a técnicas capazes de fornecer soluções numéricas aproximadas.

O uso desta ferramenta para simulações em problemas de vibrações é amplamente empregada. ARNDT (2008) afirma que atualmente, a correta determinação das características dinâmicas de sistemas mecânicos e estruturas é muito importante na fase de projeto, principalmente nas indústrias automotiva e aeronáutica. Estas informações permitem projetos otimizados e que evitam o surgimento de processos vibratórios indesejáveis. Bem como SAYER (2005) que diz que o estudo de vibrações deve incluir uma solução que atenda os problemas

identificados pelo estudo. As soluções para problemas de vibração envolvendo a excitação de uma frequência natural (ressonância) são frequentemente difíceis de obter apenas com base em dados experimentais.

Uma grande vantagem, para este trabalho, é a utilização deste método para a determinação dos Modos de Vibração do cone do alto-falante. Sem esta ferramenta computacional esta determinação seria inviável.

2. Procedimento Experimental

2.1. Materiais

2.1.1. Seleção do alto-falante

O alto-falante selecionado para a realização deste estudo foi um produto simples, que não possui singularidades e que representa de maneira genérica o comportamento de um alto-falante comum. Este produto é capaz de responder em uma larga faixa de frequência, assim, a região de estudo fica estendida, facilitando a detecção de possíveis alterações no seu comportamento. O alto-falante possui um cone igualmente simples, que contém o mínimo de componentes possíveis em sua estrutura. Deste modo, os efeitos gerados pela adição de diferentes constituintes serão percebidos com maior facilidade.

Levando em consideração estas necessidades, o alto-falante selecionado para este estudo foi o *woofer* modelo Selenium 12W8P (Figura 11), um *woofer* profissional de grande aceitação de mercado, com uma ampla faixa de resposta, de 70 a 4.000 Hz (ver Figura 12) e com um cone composto apenas de Celulose + Resina fenólica.



Figura 11 – *Woofer* modelo 12W8P.

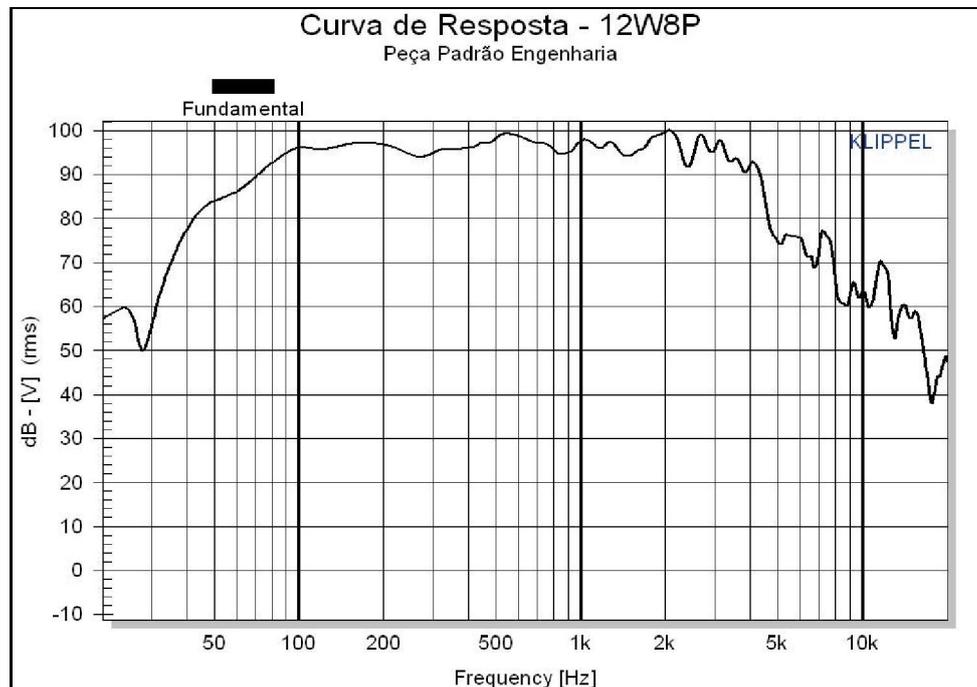


Figura 12 – Curva de Resposta do modelo 12W8P.

2.1.2. Equipamentos

O procedimento de construção dos cones-teste foi realizado nas instalações da fábrica de cones da Selenium, utilizando-se uma série de equipamentos para a confecção completa, desde a preparação da massa até o acabamento final.

As medições acústicas foram realizadas no Laboratório de Ensaios e Testes da Eletrônica Selenium, no equipamento Klippel Analyser 2 (Figura 13), que fornece tanto a curva de resposta como os parâmetros do alto-falante.

Já as medições mecânicas (testes de potência) foram realizadas no Laboratório de Ensaios e Testes da Eletrônica Selenium. No LAPOL, realizou-se o ensaio de DMA.

A análise por Elementos Finitos foi realizada na Selenium utilizando-se o software ANSYS WORKBENCH v11.



Figura 13 – Equipamento Klippel Analyser 2.

2.2. Métodos

2.2.1. Construção dos cones-teste

2.2.1.1. Preparação das fibras

A fibra de sisal empregada nos cones-teste foi adquirida em forma de rolo (Figura 14). Portanto a primeira etapa para a construção destes cones foi a preparação desta fibra.



Figura 14 – Fibra de Sisal em forma de rolo.

Para este estudo utilizou-se um tamanho de fibra de aproximadamente 10 mm de comprimento, cortada a partir do rolo com o auxílio de uma régua para manter o comprimento da fibra constante (Figura 15).



Figura 15 – Processo de corte das fibras.

Na seqüência estas fibras foram para um banho em água para serem lavadas e suas impurezas retiradas (deixadas de molho por cerca de 4 horas). Após secarem, elas foram analisadas para conferir a homogeneidade de tamanho e a qualidade das fibras. Depois, as fibras foram pesadas e armazenadas (Figura 16).

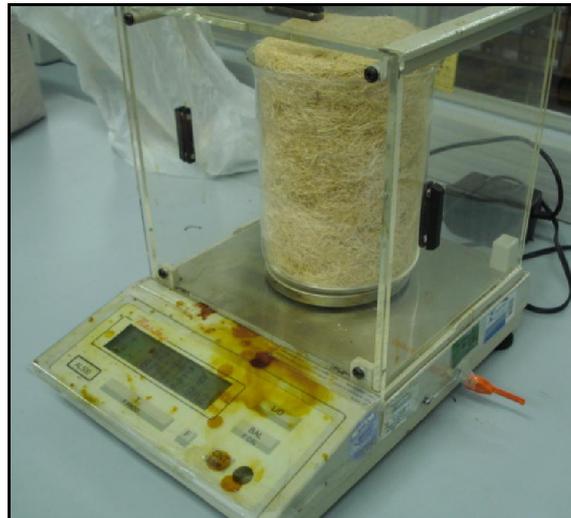


Figura 16 – Pesagem final das fibras.

2.2.1.2. Preparação da solução

O cone original do *woofer* 12W8P é composto por celulose + ligante (EKA) + água + resina fenólica. Para a criação dos cones-teste, esta composição foi alterada, onde uma determinada quantidade de celulose foi retirada e uma massa equivalente de fibras de sisal foi acrescentada, mantendo-se constante as quantidades dos demais constituintes. Assim, conserva-se também, o peso final do cone original. Este dado é importante, pois, conforme visto na Revisão Bibliográfica (item 1.1.4.), o Mms fica inalterado, mantendo outros diversos parâmetros constantes, independente da quantidade de sisal.

Foram estudadas três diferentes composições de cone:

- Cone-teste 1: 12,5% de fibra de sisal
- Cone-teste 2: 25% de fibra de sisal
- Cone-teste 3: 50% de fibra de sisal

Iniciando-se o processo de fabricação dos cones, na fábrica de cones da Selenium, foi produzida uma solução contendo as porcentagens padrão em peso de celulose + sisal + ligante + água. A resina é acrescida em um processo posterior.

A primeira etapa deste processo é a homogeneização da solução. Para tanto, utiliza-se um balde metálico onde são misturados os componentes com auxílio de um misturador. Neste equipamento, há uma hélice que fica em constante rotação, mantendo os componentes da mistura em movimento.

O primeiro componente a ser inserido no balde (já contendo a quantidade de água necessária) é o sisal (Figura 17). Após todo o sisal ser lentamente adicionado, acrescenta-se a celulose (em forma de placas, Figura 18). Por fim, é acrescentado o ligante. Esta solução fica no misturador por aproximadamente 15 minutos, a fim de garantir a homogeneização. O resultado é uma solução pastosa contendo celulose + sisal + água + EKA (Figura 19).



Figura 17 – Fibras de sisal sendo adicionados à solução.



Figura 18 – Celulose sendo adicionada à solução.



Figura 19 – Solução final sendo misturada.

2.2.1.3. Processo de fabricação

A solução preparada segue para o processo de prensagem e conformação. Primeiramente, a solução é inserida em uma prensa, onde, à frio, o cone recebe uma pré-forma (Figura 20). Após, aproximadamente 1 min, esta pré-forma segue para uma segunda prensa, onde, à quente, o cone recebe sua forma final (Figura

21). Nesta segunda prensa, o cone fica aproximadamente 2 minutos sob pressão e calor.



Figura 20 – Cone recebendo uma pré-forma.



Figura 21 – Cone em sua forma final.

Na seqüência, o cone recebe a impregnação e a pintura. Esta etapa é feita manualmente, através de uma pistola que aplica uma resina fenólica mais o pigmento (Figura 22). O cone fica em constante rotação através de sua fixação em uma estrutura rotatória, assim a aplicação torna-se mais fácil, rápida e garante-se maior homogeneidade na aplicação. A seguir, o cone passa por uma esteira de aquecimento (Figura 23) onde recebe calor suficiente para a resina realizar seu

processo de cura, 92° por cerca de 8 min. Ao final, o cone sai impregnado, pintado e seco (Figura 24).



Figura 22 – Aplicação da resina + tinta.



Figura 23 – Esteira de aquecimento.



Figura 24 – Cone final, após ter sido impregnado, pintado e seco.

Por fim, o cone recebe o acabamento final. Ele é cortado, tanto em seu diâmetro maior como no seu diâmetro menor, a fim de garantir as dimensões necessárias para o encaixe da bobina (diâmetro menor) e para a colocação do anel de suspensão. A Figura 25 mostra o cone já acabado e com o seu anel de suspensão.



Figura 25 – Cone acabado como seu anel de suspensão.

2.2.2. Montagem dos protótipos

Foram montados inicialmente três alto-falantes utilizando o cone original do produto 12W8P, cone composto por celulose + ligante + água. Estes produtos foram confeccionados utilizando-se os demais componentes em seus valores nominais, a fim de evitar a alteração dos demais parâmetros não relacionados ao cone. A estes alto-falantes construídos com os cones em sua composição original foi dado o nome de Falante-Atual, ou Falantes A1, A2 e A3 (Figura 26).



Figura 26 – Alto-falantes 12W8P confeccionados com o cone original.

Utilizando o mesmo procedimento, foram construídos os produtos com os cones-teste. Para cada composição diferente de cone foram confeccionados três alto-falantes. Para os alto-falantes utilizando os cones com a composição de 12,5% de fibra de sisal foi dado os nomes de S12_1, S12_2 e S12_3. Aos com 25% de fibra de sisal, S25_1, S25_2 e S25_3. E por fim, aos com 50% de fibra de sisal, S50_1, S50_2 e S50_3.

2.2.3. Medições

2.2.3.1. Parâmetros Acústicos e Curvas de Resposta

Procedeu-se primeiramente as medições acústicas (parâmetros de Thiele-Small). Os parâmetros de cada um dos alto-falantes foram medidos no Klippel (Figura 27). Seguidos de uma medição de Curva de Resposta utilizando-se o mesmo equipamento (Figura 28).



Figura 27 – Medição dos Parâmetros de Thille-Small.



Figura 28 – Câmara onde realizou-se as medições das Curvas de Resposta.

2.2.3.2. Potência

Para testar as propriedades mecânicas dos cones foram realizados ensaios de potência modificados, realizados na sala de ensaio de potência no Laboratório de acústica da Selenium (Figura 29). Um ensaio de potência regular é realizado aplicando ruído rosa, na faixa de 60 a 20.000 Hz, na potência máxima especificada para o produto durante 2 h. No caso do 12W8P, esta potência máxima é especificada em 150W RMS.

No ensaio realizado para este estudo, denominado ensaio “Quebra-Cone”, foi aplicado ruído rosa, na faixa de 20 a 100Hz, na potência máxima especificada para o produto durante 2 h. Com a aplicação desta baixa frequência, o deslocamento do cone é máximo, exigindo um esforço mecânico muito maior. Durante este ensaio, é monitorado, além do tempo, a temperatura na bobina. O ensaio Quebra-Cone foi aplicado aos alto-falantes A1 e S501.

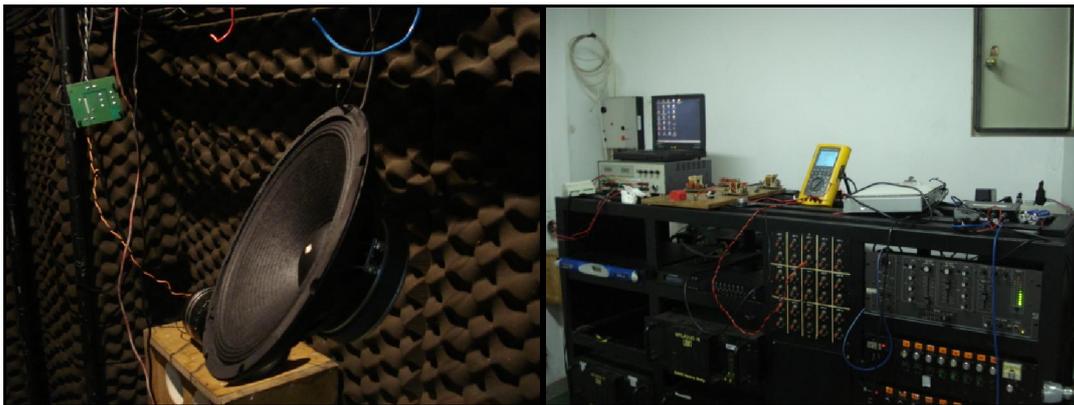


Figura 29 – Sala onde são realizadas as medições dos Testes de Potência.

2.2.3.3. Ensaio de DMA

Realizou-se os ensaios de DMA (*Dynamic Mechanical Analysis* ou Análise Dinâmica Mecânica) no Laboratório de Materiais Poliméricos do Departamento de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul onde a partir das curvas geradas foi possível estimar a rigidez e a resistência dos materiais produzidos.

2.2.3.4. Caracterização das Frequências de Ressonância dos Novos Materiais

Para se caracterizar os novos materiais formados com as diferentes quantidades de fibra de sisal, foi desenvolvido um sistema de medição de Frequência de Ressonância. O princípio deste sistema é excitar um corpo de prova em uma faixa de frequência, e com o auxílio de um laser, medir em qual frequência este corpo de prova obteve seu maior deslocamento. Conforme foi visto na Revisão Bibliográfica, neste ponto de maior deslocamento encontra-se a frequência natural de ressonância do corpo.

Utilizando um equipamento de corte (Figura 30), foram gerados corpos de prova dos diferentes cones desenvolvidos. Para excitá-los é gerado, no Klippel Analyser 2, uma varredura de frequências. Este sinal sonoro é lançado para um alto-falante do tipo *Sub-woofer* instalado em uma caixa acústica dutada. Através do sinal reproduzido pelo alto-falante que sai pelo duto que fica posicionado logo abaixo de onde o corpo de prova é fixado, o corpo é excitado. O deslocamento é medido pelo laser do Klippel Analyser 2, localizado logo acima do corpo de prova. A Figura 31 apresenta um esquemático deste sistema de medição. Assim é possível determinar a frequência de ressonância de cada material.



Figura 30 – Cortador gerador de corpos de prova.



Figura 31 – Sistema de medição de frequência de ressonância.

2.2.4. Análise Computacional

A fim de simular o comportamento dos cones empregados no alto-falante modelo 12W8P, utilizou-se o software ANSYS WORKBENCH v11. A interface deste software é apresentada na Figura 32.

Realizou-se uma simulação de Análise Modal para o cone original e para o cone com 50% de fibra de sisal. Para tanto, alimentou-se o ANSYS com as propriedades necessárias para esta análise: Módulo de Elasticidade e densidade. Foi criado um desenho tridimensional do formato do cone. Este desenho, de tamanho real, sem escalas, foi importado para o ANSYS. No software foram criados dois projetos, um para o cone original e outro para o cone sisal 50%. Após, foram criados os dois materiais virtuais com as propriedades específicas de cada um.

Esta simulação baseia-se nos princípios da análise modal, citada anteriormente. Ao cone é aplicado uma varredura de frequências e, em resposta, o software apresenta os modos de vibração existentes. O cone é fixado em seu diâmetro maior, permitindo o movimento do resto do corpo. Ao final é gerado um

diagrama de cores que indicam, em cada frequência, os níveis de deslocamento no corpo.

Esta foi uma simulação computacional simplificada, não levando em consideração a contribuição do anel de suspensão e aranha para a determinação de seu comportamento, bem como as demais propriedades dos materiais envolvidos.

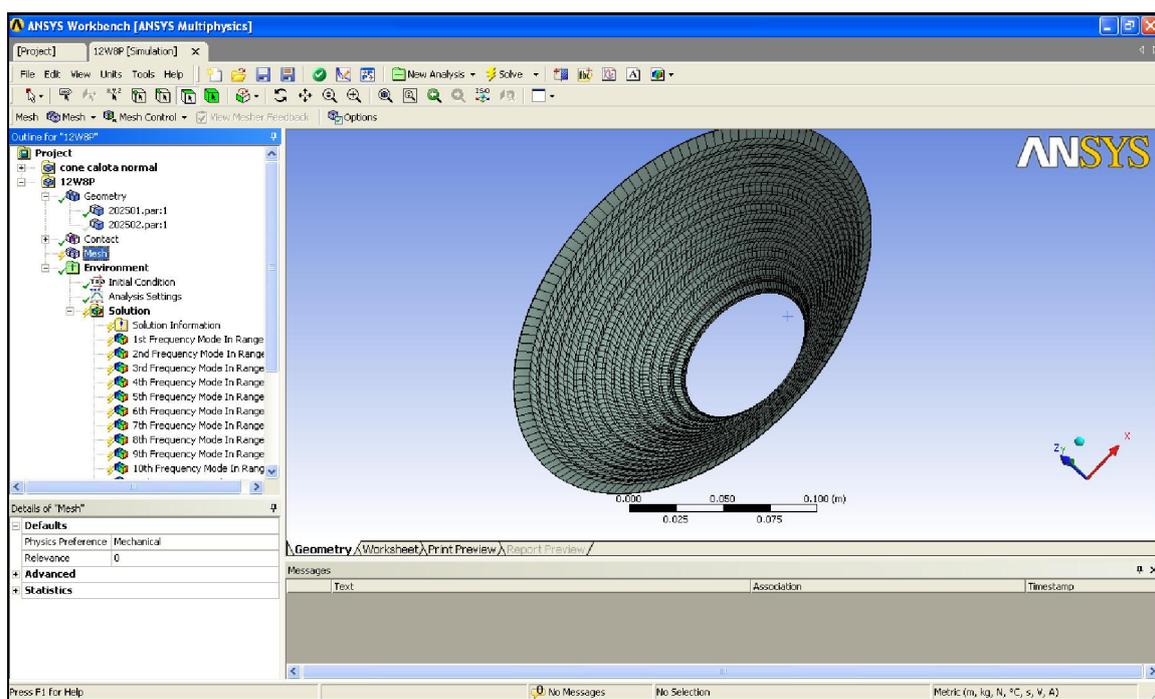


Figura 32 – Interface do ANSYS WORKBENCH v11.

2.2.5. Teste Auditivo

Após a realização das diversas medições quantitativas dos alto-falantes, foi realizado um último teste comparativo. Neste teste auditivo, dois alto-falantes são testados de forma comparativa, onde ambos são acoplados a um *baffle* (i.e. uma parede), conforme se observa na Figura 33. Para ambos alto-falantes são aplicados o mesmo sinal sonoro, porém é possível optar pela reprodução do sinal em apenas um alto-falante de cada vez. Ou seja, é possível ficar variando a

reprodução do sinal sonoro, ora reproduzido pelo alto-falante da direita e ora, pelo da esquerda. Assim, é possível perceber auditivamente, de forma simples, as diferentes características dos alto-falantes.

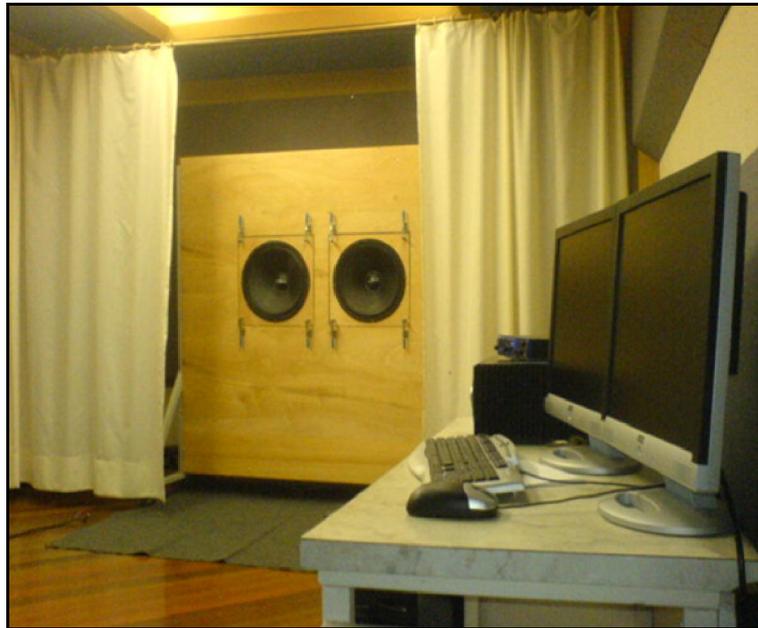


Figura 33 – Sala de Audição, onde são realizados os testes auditivos.

3. Resultados e Discussão dos Resultados

3.1. Parâmetros e Curvas de Resposta

Os resultados das medições dos parâmetros de Thiele-Small são apresentados na Tabela 01. Para cada medida dos parâmetros nos cones-teste é apresentado também a diferença relativa à medida da peça original. Foram destacados os principais parâmetros de um alto-falante.

Tabela 01 – Parâmetros Thiele-Small utilizando cones com diferentes composições.

	Original	Sisal 12,5%		Sisal 25%		Sisal 50%		
		Valor	Variação	Valor	Variação	Valor	Variação	
Parâmetros elétricos	Re (Ohm)	5.19	5.16	-0.58%	5.18	-0.19%	5.02	-3.28%
	Krm	0.0025	0.0015	-40.00%	0.002	-20.00%	0.0012	-52.00%
	Erm	0.81	0.87	7.41%	0.84	3.70%	0.9	11.11%
	Kxm	0.0115	0.0071	-38.26%	0.011	-4.35%	0.0067	-41.74%
	Exm	0.73	0.79	8.22%	0.74	1.37%	0.79	8.22%
	Cmes (μ F)	314.41	299.02	-4.89%	321.51	2.26%	332.53	5.76%
	Lces (mH)	21.69	25.78	18.86%	23.98	10.56%	22.54	3.92%
	Res (Ohm)	101.99	102.31	0.31%	87.59	-14.12%	89.46	-12.29%
	fs (Hz)	58.1	58.7	1.03%	59.41	2.25%	60.1	3.44%
Parâmetros mecânicos	Mms (g)	43.712	43.521	-0.44%	46.387	6.12%	42.490	-2.80%
	Mmd (Sd) (g)	---	---	-	39.483	-	35.587	-
	Rms (Kg/s)	1.363	1.307	-4.11%	1.647	20.84%	1.428	4.77%
	Cms (mm/N)	0.156	0.159	1.92%	0.155	-0.64%	0.158	1.28%
	Kms (N/mm)	6.41	5.47	-14.66%	6.02	-6.08%	5.67	-11.54%
	BI (N/A)	11.79	11.44	-2.97%	12.01	1.87%	11.3	-4.16%
	Lambda s	0.073	0.075	2.74%	0.086	17.81%	0.076	4.11%
Fatores de perda	Qtp	0.627	0.624	-0.48%	0.595	-5.10%	0.604	-3.67%
	Qms	12.279	11.803	-3.88%	10.143	-17.40%	10.866	-11.51%
	Qes	0.625	0.626	0.16%	0.6	-4.00%	0.61	-2.40%
	Qts	0.594	0.595	0.17%	0.566	-4.71%	0.577	-2.86%

Assim, pode-se observar que o parâmetro f_s (frequência de ressonância) é levemente alterado à medida que se adiciona fibras à composição do cone. Isso é explicado pelo aumento na rigidez do cone devido ao aumento na quantidade de fibra, fazendo com que sua frequência de ressonância seja alterada para valores maiores.

O parâmetro C_{ms} (Complância) quase não foi alterado. As diferenças associadas, abaixo de 2%, são, provavelmente, devido às complâncias do anel de suspensão e da aranha.

Ao se analisar o parâmetro Q_{ts} , não se percebe uma relação com o aumento na quantidade de fibra. Como o Q_{ts} é um parâmetro que é calculado a partir do C_{ms} , M_{ms} , F_s , B_l , R_e e R_{ms} , é esperado que seu comportamento não seja vinculado à quantidade de fibra de sisal presente no cone. É possível considerar, devido às baixas diferenças, que o Q_{ts} não sofreu alteração.

Portanto, estes dados mostram que a adição de fibras de sisal, tanto com 12,5%, 25% e 50%, não afetaram o desempenho acústico do alto-falante, pois os dados não indicam mudanças significativas. Uma análise com base apenas nestes parâmetros indicaria se tratar de mesmo modelo de alto-falante, sem alterações entre os produtos. Isto era, de certo modo esperado, pois substituiu-se um composto ligno-celulósico por outro.

Esta indiferença com relação à adição de fibra de sisal ao cone do modelo 12W8P é confirmada ao se analisar as curvas de resposta dos diferentes protótipos. A Figura 34 apresenta um comparativo entre as curvas de resposta (com a aplicação de 1 W) utilizando os cones A1, S121, S251 e S501.

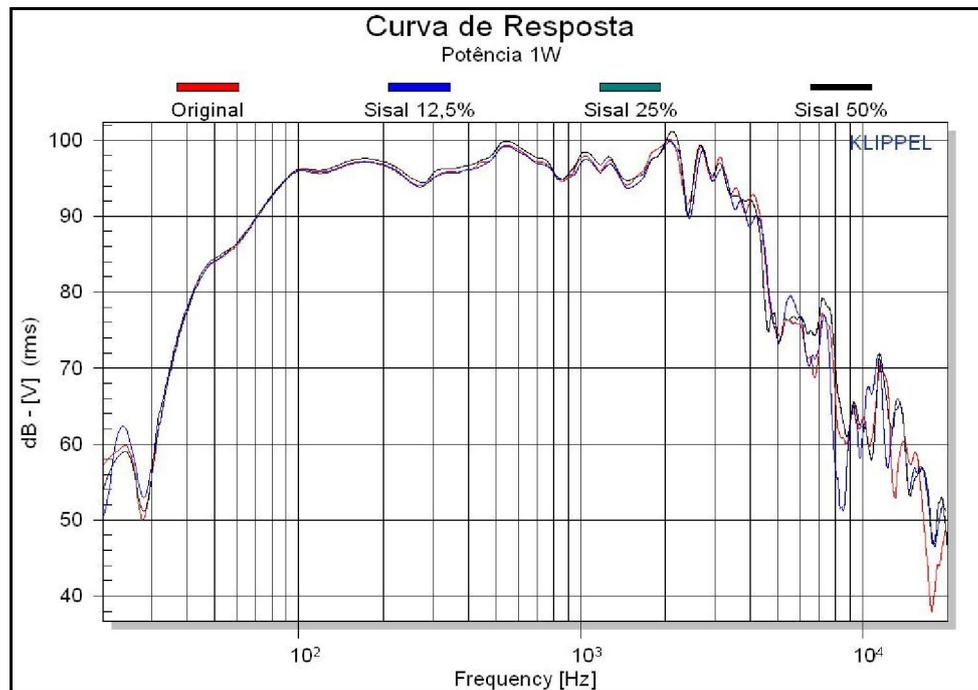


Figura 34 – Curvas de resposta (a 1W) obtidas para os diferentes cones.

Este mesmo comportamento é observado com as curvas de resposta geradas a uma potência de 100 W (Figura 35). Com a aplicação desta maior potência, o cone passa a ser mais solicitado mecanicamente, pois o deslocamento dele é proporcionalmente maior. Porém, a resposta acústica mostrou-se indiferente à presença dos diferentes teores de fibra no cone.

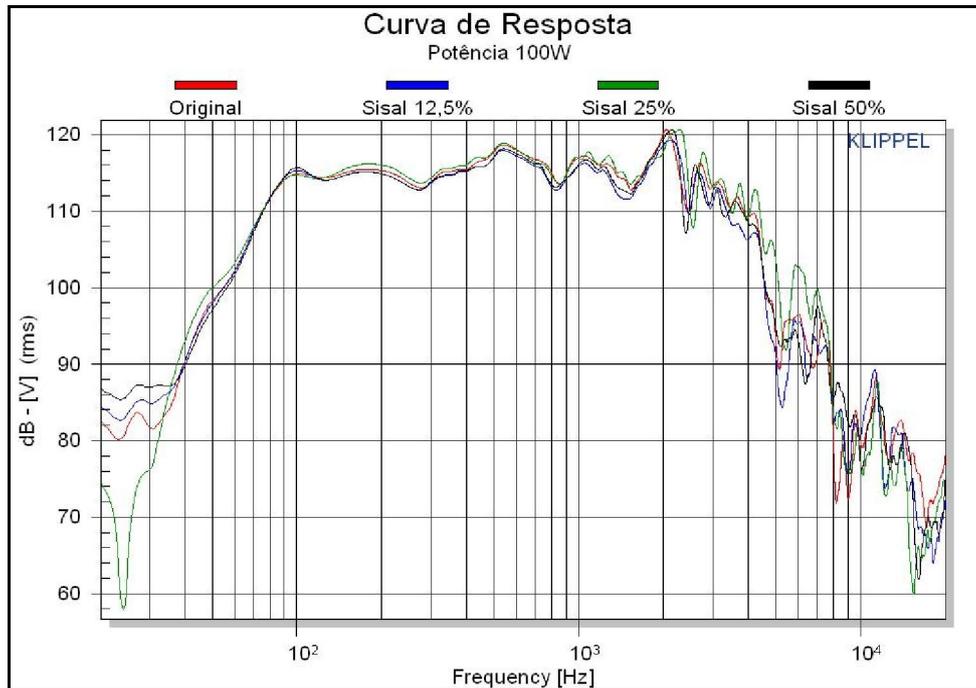


Figura 35 – Comparativo entre as curvas de resposta (a 100W) utilizando os diferentes cones.

Porém, ao analisar-se o nível de distorção harmônica (Figura 36), em curvas geradas com potência de 1 W utilizando-se os mesmos alto-falantes das curvas de resposta anteriores, observa-se uma pequena diferença no comportamento dos diferentes cones. Há uma elevação na distorção na faixa de 100 Hz, porém esta diferença de 3% é tão pequena que não chega a ser sensível ao ouvido humano.

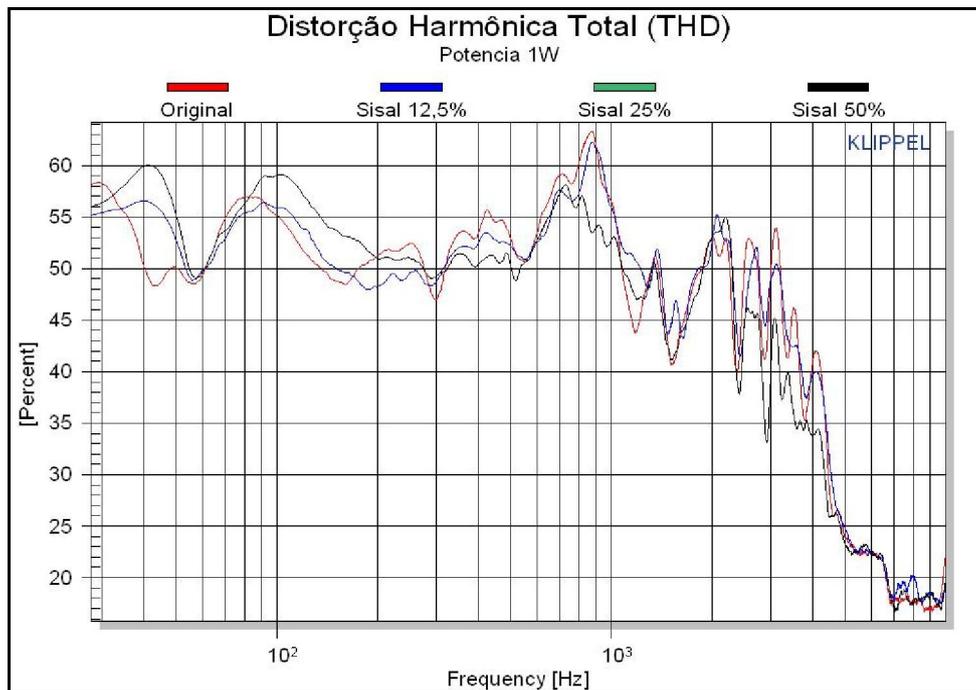


Figura 36 – Curvas de Distorção Harmônica (a 1W) utilizando os diferentes cones.

Entretanto, quando a distorção harmônica total é medida aplicando-se 100 W de potência, a diferença de resposta entre os cones é mais evidente. Conforme se observa na Figura 37, todos os cones que utilizam fibra de sisal em sua composição tiveram um aumento de distorção quando comparado ao cone que não utiliza fibra, chegando a uma distorção até 12% superior. Contudo, este aumento de distorção não foi percebido nos testes auditivos que serão comentados posteriormente neste trabalho.

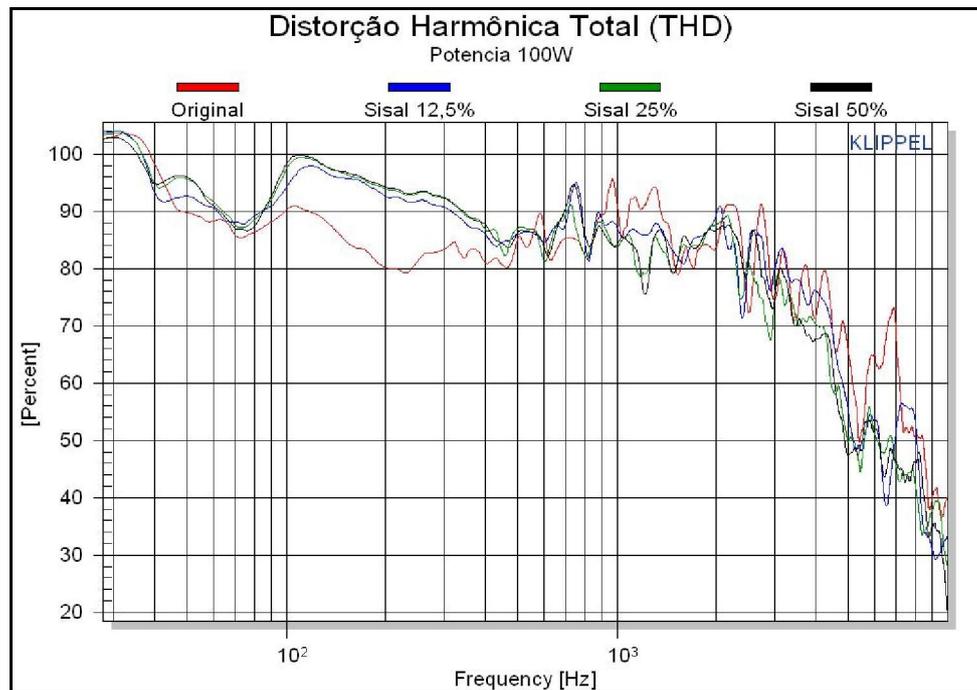


Figura 37 – Comparativo entre as curvas de distorção harmônica (a 100 W).

3.2. Análise de Potência

A partir do ensaio “Quebra-Cone”, foi gerado o gráfico apresentado na Figura 38. Observa-se que o modelo 12W8P utilizando o cone em sua composição original, teve seu cone rompido (Figura 39) num tempo inferior a 10 min. Com o cone rompido, o sistema móvel não pode se manter centrado no GAP, tendo sua movimentação interrompida, gerando assim, o aumento elevado de temperatura registrado no gráfico próximo aos 10 min iniciais de teste.

Entretanto, o alto-falante, utilizando 50% de sisal em sua composição, teve seu funcionamento interrompido somente após aproximadamente 2 h. O motivo pelo qual o alto-falante parou de funcionar foi o rompimento do fio da bobina. Assim, a movimentação no sistema móvel fica interrompida, fazendo com que a bobina não seja resfriada, gerando, conseqüentemente, o aumento abrupto de temperatura indicado no gráfico.

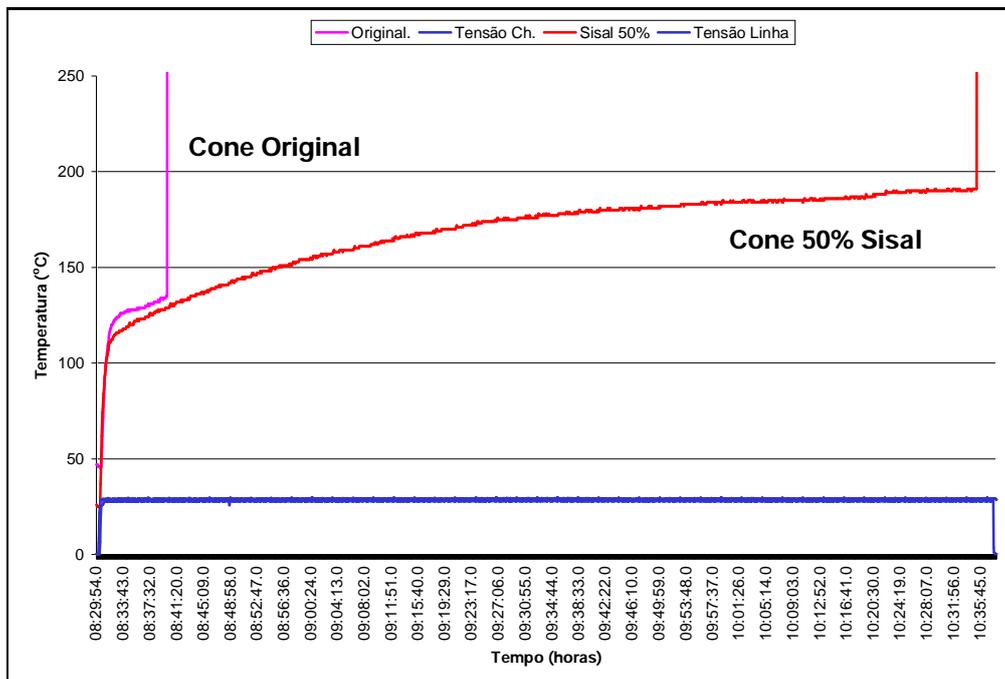


Figura 38 – Gráfico da Temperatura × Tempo gerado a partir de um Teste de Potência.



Figura 39 – Comparativo entre os alto-falantes após o Teste “Quebra-Cone”.

Com este ensaio fica evidente a melhor resistência ao rasgo adquirida pelo cone que utiliza fibra de sisal. Esta propriedade foi adquirida devido à interação entre resina/fibra, melhorando as propriedades mecânicas do material. Com isso, é possível afirmar que o fator limitante para se determinar a potência específica do

alto-falante modelo 12W8P, utilizando um cone com 50% de sisal em sua composição, é a bobina, e não o cone.

3.3. Análise de DMA

O resultado obtido na análise de DMA é apresentado na Figura 40. A amostra do cone original (curva em vermelho) obteve os valores mais baixos de rigidez e resistência, em comparação com as amostras com sisal (em preto e em azul). A amostra com 50% de sisal é a que atingiu o maior valor de Tensão na ruptura e também a maior rigidez (aproximadamente $E_{\text{original}} = 1,5 \text{ GPa}$, $E_{\text{sisal } 50\%} = 5 \text{ GPa}$), comprovando o que havia sido constatado ao se analisar o parâmetro F_s das diferentes amostras.

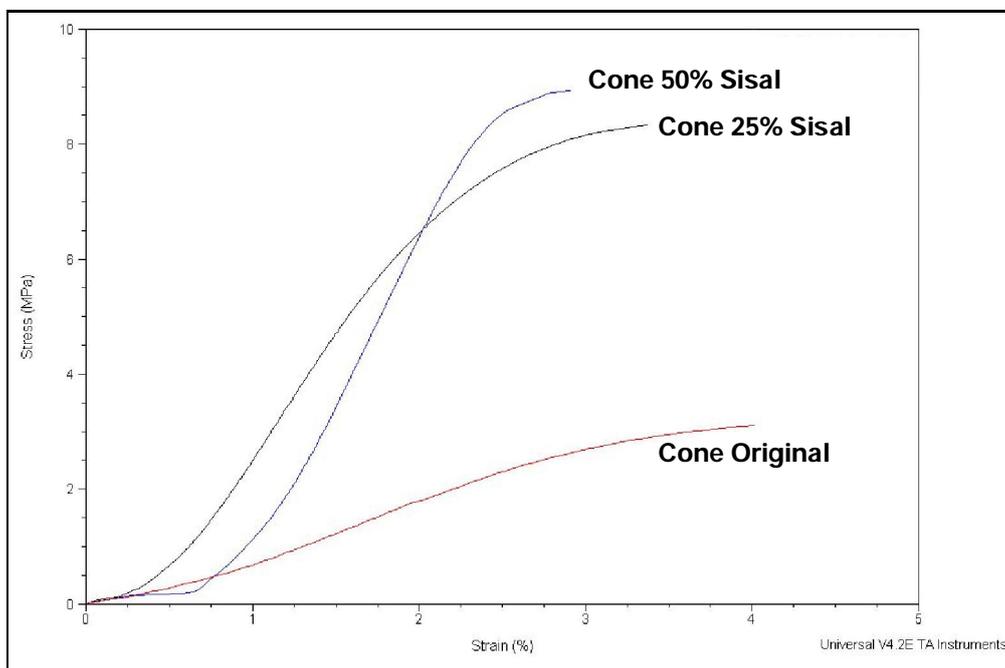


Figura 40 – Curva tensão × deformação gerada pelo DMA.

3.4. Análise da Frequência de Ressonância

Ao se realizar os testes para se determinar a frequência de ressonância das amostras foram gerados os gráficos apresentados nas Figuras 41 e 42.

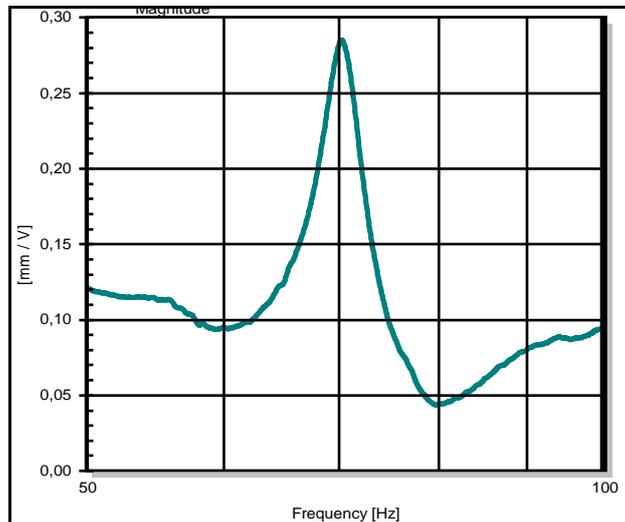


Figura 41 – Curva de deslocamento do corpo de prova com 0% de sisal.

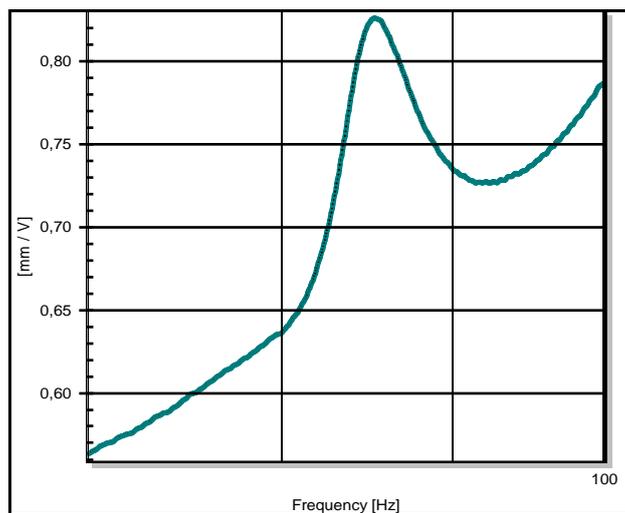


Figura 42 – Curva de deslocamento do corpo de prova com 50% de sisal.

Com estes gráficos, determinou-se as frequências de ressonância para cada amostra, sendo 70,1 Hz para o cone original e 85,3 Hz para o cone com 50% sisal.

As amostras apresentaram o comportamento esperado, pois a adição de sisal alterou a rigidez do material (E) conforme comprovado anteriormente e, com esse aumento, é esperado que a sua frequência de ressonância também aumente.

3.5. Análise por Elementos Finitos

Depois de realizada as duas simulações de análise modal (uma para o cone original e outra para o cone sisal 50%), cada um levando em média 120 min, foram gerados os vinte primeiros modos de vibração do cone. Para esta simulação, utilizou-se uma simetria na geometria no cone, onde apenas metade dele foi simulado, economizando-se assim um significativo tempo de processamento. Foi informado ao software que somente metade da geometria do corpo havia sido carregada, a ele coube adaptar seus cálculos. Garantindo assim o mesmo resultado para uma mesma simulação com metade ou com a geometria inteira. O software gera um diagrama de cores indicando os deslocamentos que estão ocorrendo. Nas cores mais quentes ocorrem os maiores deslocamentos, enquanto que nas mais frias, os menores deslocamentos.

A Tabela 02 apresenta as frequências correspondentes a estes 20 primeiros modos.

Tabela 02 – Freqüências correspondentes aos vinte primeiros Modos de Vibração dos diferentes Cones.

Modo de Vibração	Freqüência (Hz)		Variação
	Original	Sisal 50%	
1	103.52	106.89	3.26%
2	130.96	134.77	2.91%
3	162.99	286.53	75.80%
4	217.11	411.72	89.64%
5	324.9	583.34	79.54%
6	429.99	599.9	39.51%
7	488.6	670.37	37.20%
8	502.78	734.58	46.10%
9	550.63	868.68	57.76%
10	562.18	902.44	60.53%
11	668.45	1070	60.07%
12	704.99	1099.7	55.99%
13	827.36	1140.3	37.82%
14	874.88	1256	43.56%
15	877.5	1354.5	54.36%
16	901.7	1444.3	60.18%
17	902.98	1450.2	60.60%
18	924.2	1484	60.57%
19	970.16	1514.3	56.09%
20	977.67	1657.2	69.51%

Observa-se nos dois primeiros modos uma pequena diferença (inferior a 4%) entre o cone original e o com sisal. Esta diferença aumenta consideravelmente nos próximos modos, atingindo diferenças de até 89%. Entretanto, estas diferenças não seguem uma mesma tendência, ora aumentando e ora diminuindo.

Observa-se também que os modos de vibração foram deslocados com a adição de 50% de sisal na composição do cone, aparecendo em freqüências superiores. O modo de vibração número 4 (Figura 43) é, possivelmente, uma fonte de distorção sonora devido ao deslocamento irregular do cone. Este modo ocorre, no cone original na freqüência de 217 Hz e no cone com sisal, na freqüência de 412 Hz.

No caso do *Woofers* 12W8P, estas duas freqüências (217 e 412 Hz) estão dentro da faixa de atuação especificada do produto. Contudo, se o trabalho

focasse em um *Sub-woofer*, cuja faixa de trabalho não chega a ultrapassar a frequência de 300 Hz, esta alteração na frequência do modo de vibração seria uma grande vantagem, pois esta distorção não faria parte da sua curva de resposta.

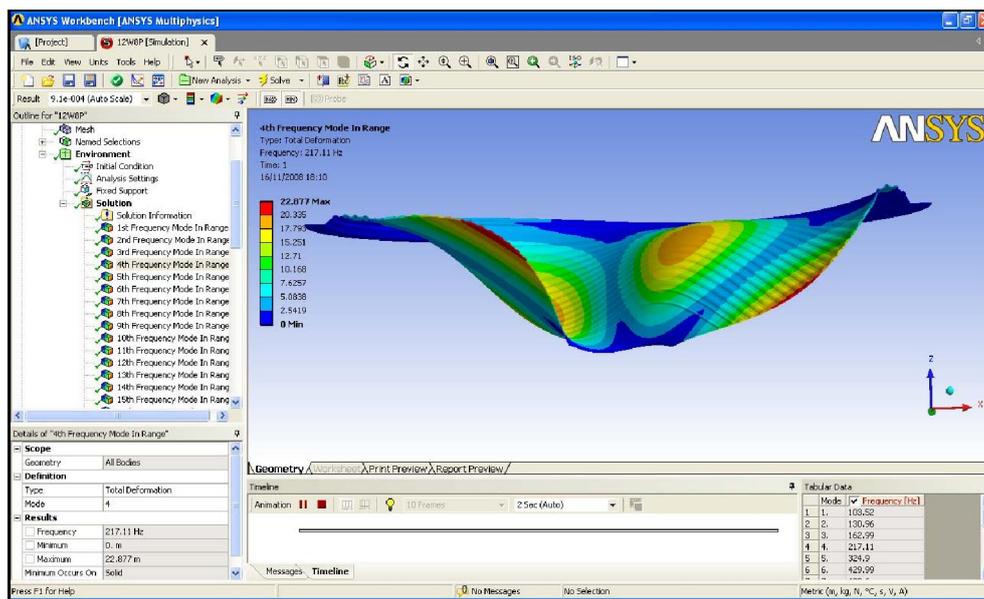


Figura 43 – Quarto modo de vibração encontrado no cone do *Woofer12W8P*.

No vigésimo modo de vibração (Figura 44) é observado o mais irregular comportamento do cone. Nesta frequência, de 978 Hz para o cone original e 1657 Hz para o cone com fibra de sisal, a distorção será acentuada. No anexo I, encontram-se os resultados dos outros modos de vibração estudados.

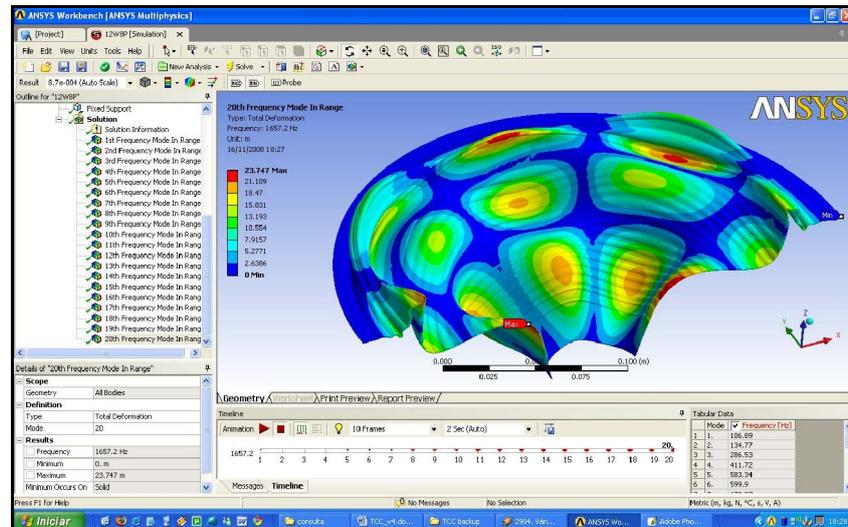


Figura 44 – Vigésimo modo de vibração encontrado no cone do *Woofers* 12W8P.

3.6. Teste Auditivo

No teste auditivo comparativo, realizado por cinco profissionais da empresa especializada em áudio, não foram constatadas mudanças significativas no alto-falante *Woofers* modelo 12W8P. As diferenças estruturais nos diferentes cones testados não ocasionaram diferenças acústicas, sendo que 100% dos ouvintes disseram tratar-se de um mesmo alto-falante.

4. Conclusões

A adição de 12,5%, 25% e 50% de fibra de sisal no cone do alto-falante *Woofers* Selenium modelo 12W8P não alterou a resposta acústica do produto. A substituição de parte da celulose por fibra de sisal não afeta significativamente os Parâmetros de THIELE-SMALL. Porém, quando aplicado uma alta potência ao alto-falante, seu nível de distorção harmônica aumenta quando se adicionado esta fibra vegetal.

Do ponto de vista de propriedades mecânicas, constatou-se melhorias no produto. O modelo original, especificado para operar a no máximo 150 W, não resistiu a uma forte solicitação no cone, rompendo muito antes do que o produto utilizando o cone com a adição de fibras de sisal. Mostrando assim uma importante aplicação em um campo de maior potência, como para o *Woofers*, sem alterar as propriedades acústicas do mesmo. Ou seja, com a adição de fibra de sisal é possível obter um alto-falante similar ao obtido apenas com pasta de celulose, porém que suporte uma potência maior.

A análise por elementos finitos mostrou ser uma importante ferramenta de projeto de produto. Apresentando resultados sólidos, de maneira rápida e barata, quando comparado a métodos tradicionais de obtenção de dados.

Assim, este trabalho apresentou uma completa avaliação de um produto alternativo e não disponível no mercado, tendo sido obtidos resultados muito promissores para uma aplicação direta pelo setor.

5. Sugestões para Futuros Trabalhos

Diversos pontos neste trabalho merecem ser estudados mais profundamente, tendo grande potencial para serem desenvolvidos e aplicados no auxílio de acadêmicos e profissionais da área:

- Estudar a influência do tamanho de fibra nas propriedades acústicas e mecânicas;
- Pesquisar a aplicação de tratamentos de limpeza e tratamento das fibras antes de serem impregnadas;
- Estudar outros tipos de resinas que proporcionem melhores propriedades;
- Pesquisar outras fibras naturais ou sintéticas para esta aplicação;
- Realizar testes comparativos com fibras hoje utilizadas em cones de alto-falantes;
- Realizar novos Testes de Potência no *Woofers* 12W8P, para constatar qual sua nova potência máxima especificada de trabalho;
- Desenvolver, de um modo geral, ensaios virtuais para melhor compreender os fenômenos mecânicos, térmicos e acústicos que ocorrem no alto-falante através do uso de análise por elementos finitos;
- Estender esta pesquisa para outros componentes de um alto-falante, como aranha, anel da suspensão e calota.

6. Referências Bibliográficas

AMICO, S. C.; COSTA, T. H. S.; CARRERA, L. C.; SANTANA, W.; GALVÃO, D. A. Caracterização de fibras de sisal da região nordeste do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 16, Brasil, 2001. Proceeding Materials Science, Vol. 2, p. 34-40.

ANGRIZANI, C.A.; VIEIRA, C.A.B.; ZATTERA, A.J.; FREIRE, E.; SANTANA, R.M.C.; AMICO, S. C. Influência do Comprimento da Fibra de Sisal e do Seu Tratamento Químico nas Propriedades de Compósitos com Poliéster. 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 15 a 19 de Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

ARNDT, Marcos. O Método dos Elementos Finitos Generalizado Aplicado à Análise de Vibrações Livres de Vigas de Euler-Bernoulli. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Métodos Numéricos em Engenharia – UFPR.

AZIZI, M.A.S., SAMIR, S.; ALLOIN, F.; SANCHES, J.Y.; DUFRESNE, A. Polymer, v.45, p. 4149, 2004. 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 15 a 19 de Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

BALEY, C.; BUSNEL, F.; GROHENS, Y.; SIRE, O. Influence of chemical treatments on surface properties and adhesion of flax fibre–polyester resin. Composites: Part A; Applied Science and Manufacturing, 2005.

BORWICK, John. Loudspeaker and Headphone Handbook. Butterworth-Heinemann Ltd. 1988.

CALLISTER, William D., Jr. MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING. An Introduction. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, 1991.

CARVALHO, L.H - Chemical Modification of Fiber for Plastic Reinforcement in Composites. In : LEÃO, A.L.; CARVALHO, F.X.; FROLLINI, E., Lignocellulosic – Plastic Composites, 1997.

DICKSON, V., Caixas Acústicas e alto-falantes, tradução Sette, Homero, H.Sheldon, Brasil, 1997.

FROLLINI, E.; PAIVA, J.M.F.; TRINDADE, W.G.; RAZERA, I.A.T.; TITA, S.P. Natural Fibers, Plastics and Composites. Klumer Academic, USA, p.193-225, 2004.

GASSAN, J.; BLEDZKI, A.K. Composites reinforced with cellulose based fibres. Progress in Polymer Science, v. 24, p. 221 – 274, 1999.

GAY, Daniel, Suong V. Hoa, Stephen W. Tsai. Composite Materials: Design and Applications. Traduzido por Stephen W. Tsai. Publicado por CRC Press, 2003.

KURUVILLA, J.; MEDEIROS, E.; CARVALHO, L.H.; Compósitos de Matriz de Poliéster Reforçados por Fibras Curtas de Sisal. Polím. C& T., Brasil, p.136-140, Out/Dez 1999.

KURUVILLA, J.; TOLEDO FILHO, R.D.; BEENA, J.; SABU, T. & CARVALHO, L.H.; A Review on Sisal Fibre Reinforced Polymer Composites; Revista Bras. Eng. Amb., v.3, n.3, p. 367-379, 1999.

LAZZARINI, Victor E P. Elementos de Acústica, Music Department. National University of Ireland, Maynooth. 2001.

PADILHA, Angelo Fernando. Materiais de engenharia: microestrutura e propriedades. Publicado por Hemus, 1997.

RADE, D.A. Introdução ao Método dos Elementos Finitos. Apostila de aula. Departamento de Engenharia Mecânica. UNICAMP.

SAYER, Robert J. Análise de elementos finitos: Uma ferramenta numérica para auxiliar estudos experimentais de vibração por causa raiz. Publicado no Portal SKF.com. Setembro de 2005.

SETTE, H.S., Análise e síntese de alto-falantes e Caixas Acústicas, H.Sheldon, Brasil, 1996.

SEVERO, Dagoberto S.; SEVERO, Sérgio L. S.; GUIMARÃES, Lenira K. Simulação do Comportamento Acústico de alto-falantes Através de Métodos Computacionais. PCE Projetos e Consultoria em Engenharia Ltda. 1997.

WAMBUA, P.; IVENS, J.; VERPOEST, I. Composites Science and Technology. Cap. 63, p.1259–1264, 2003.

Anexo I – Modos de Vibração Estudados

Neste anexo são apresentados todos os Modos de Vibração estudados neste trabalho.

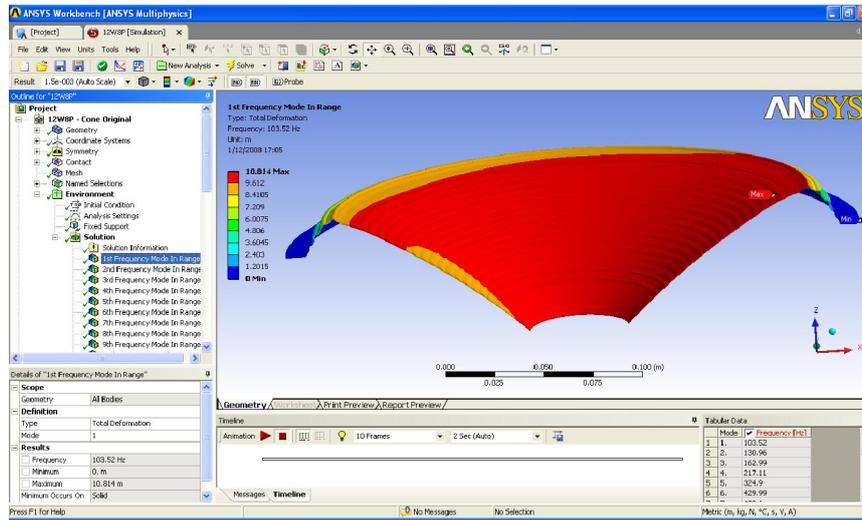


Figura 45 – 1º Modo de Vibração.

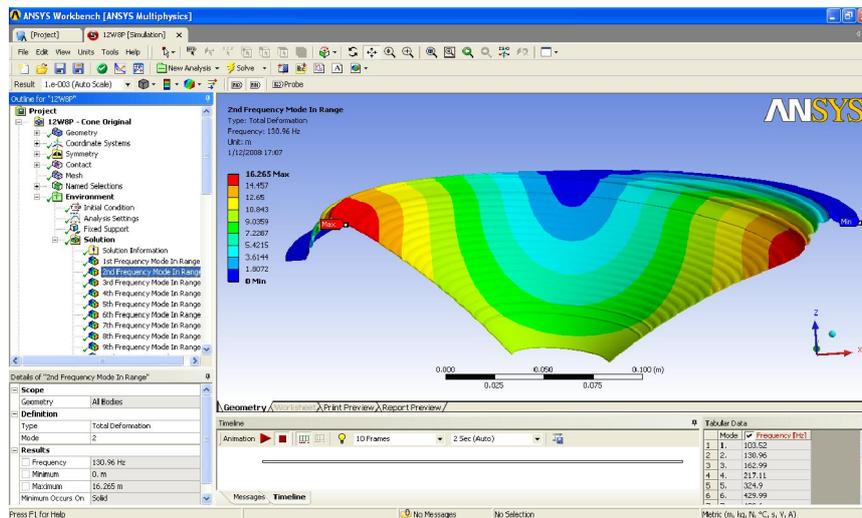


Figura 46 – 2º Modo de Vibração.

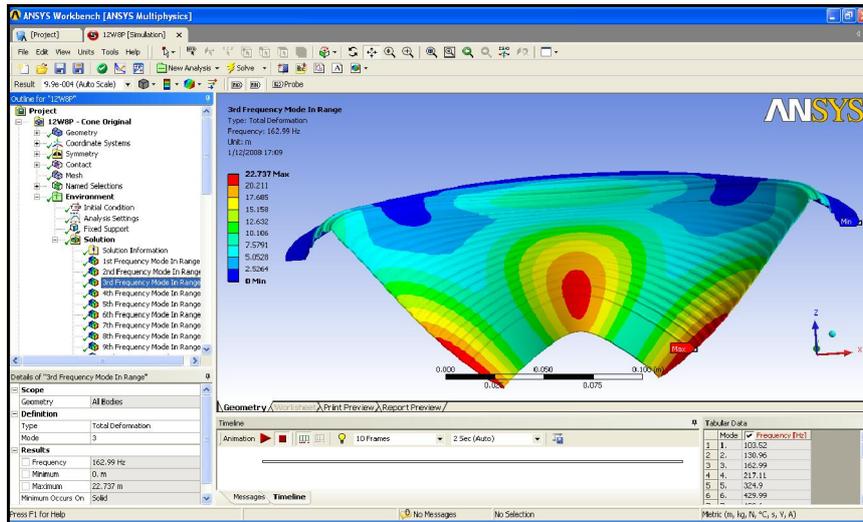


Figura 47 – 3º Modo de Vibração.

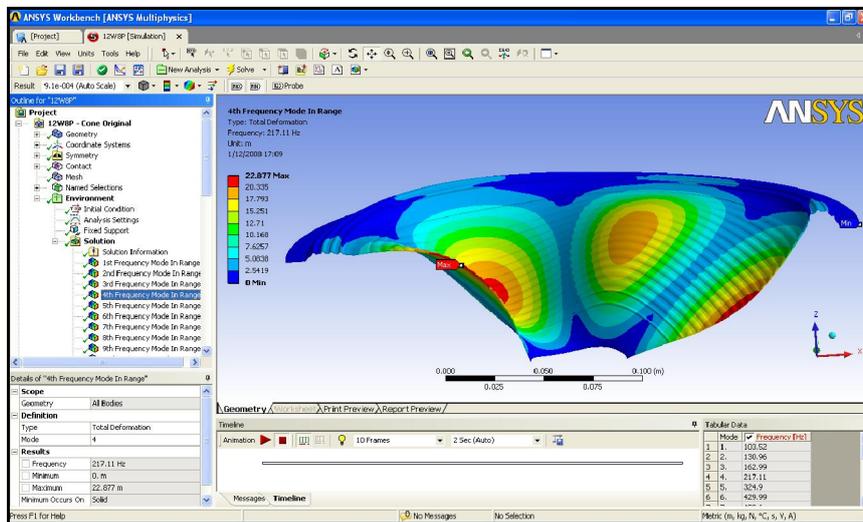


Figura 48 – 4º Modo de Vibração.

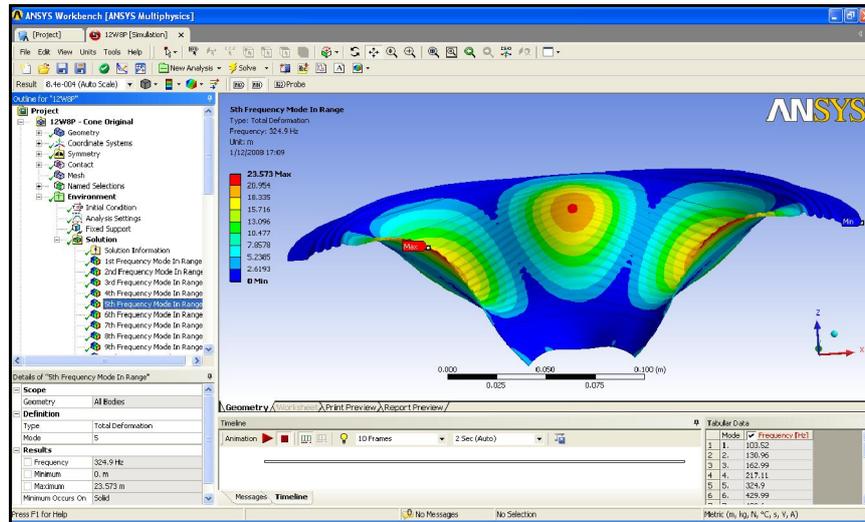


Figura 49 – 5º Modo de Vibração.

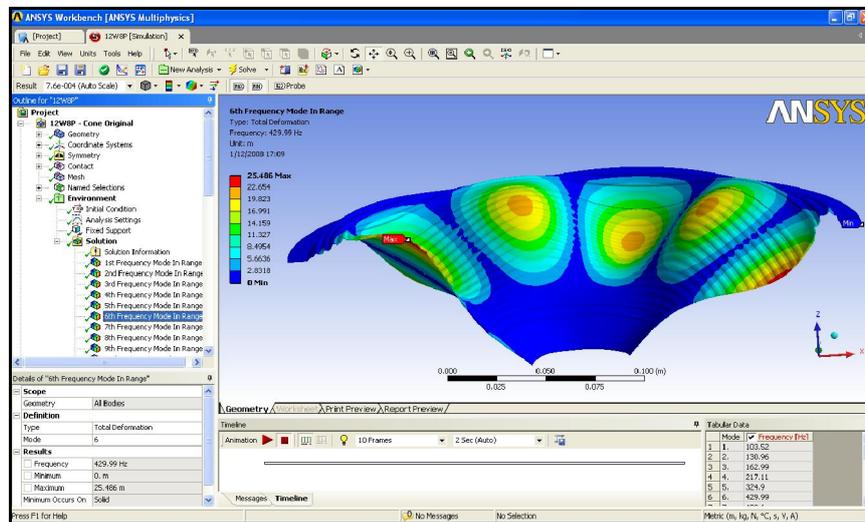


Figura 50 – 6º Modo de Vibração.

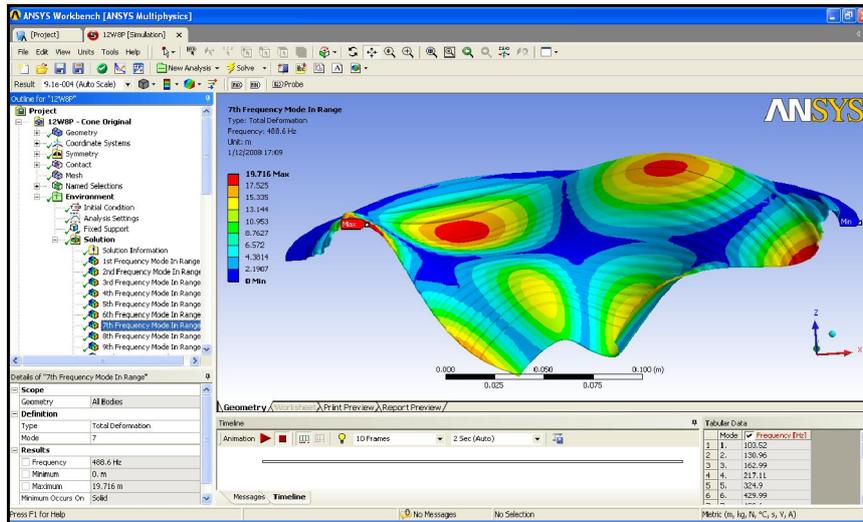


Figura 51 – 7º Modo de Vibração.

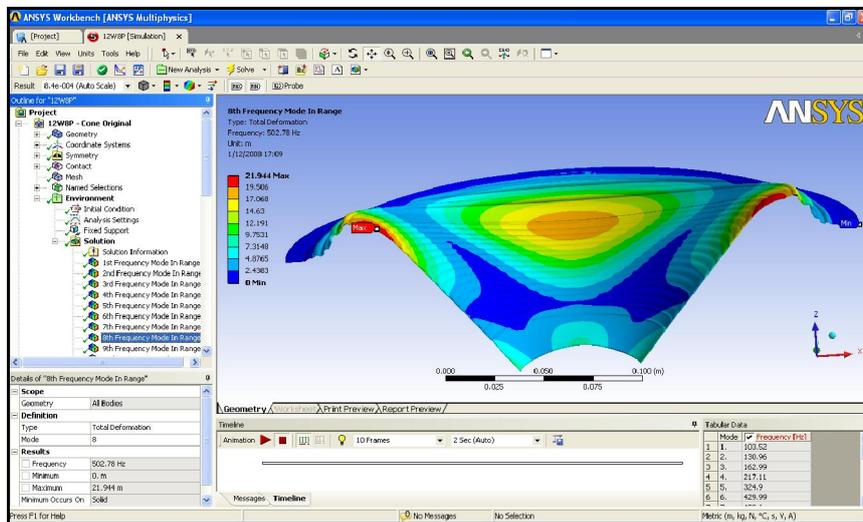


Figura 52 – 8º Modo de Vibração.

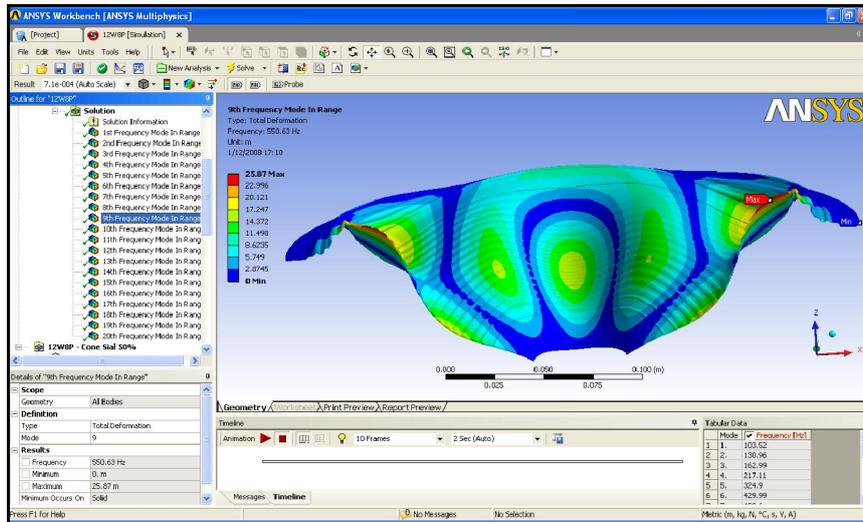


Figura 53 – 9º Modo de Vibração.

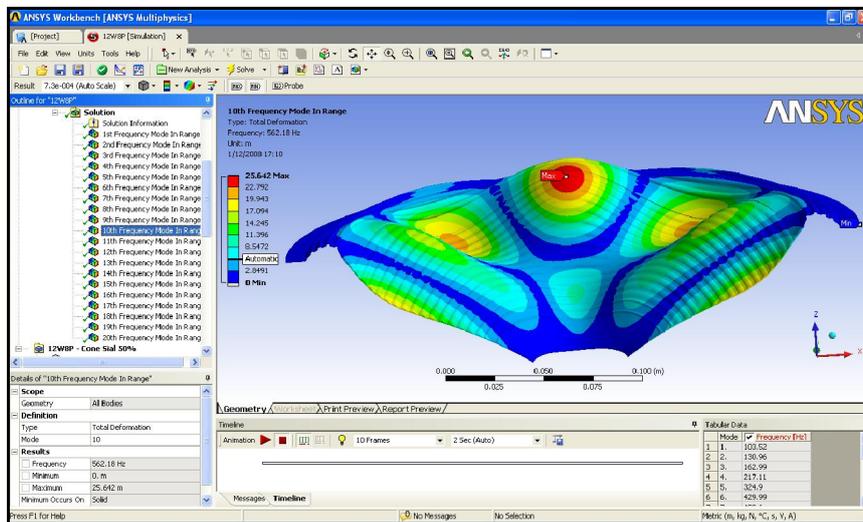


Figura 54 – 10º Modo de Vibração.

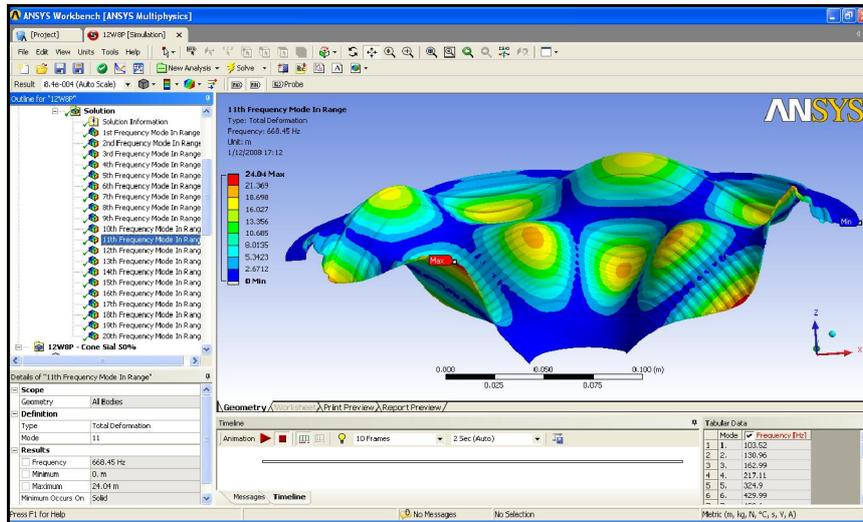


Figura 55 – 11º Modo de Vibração.

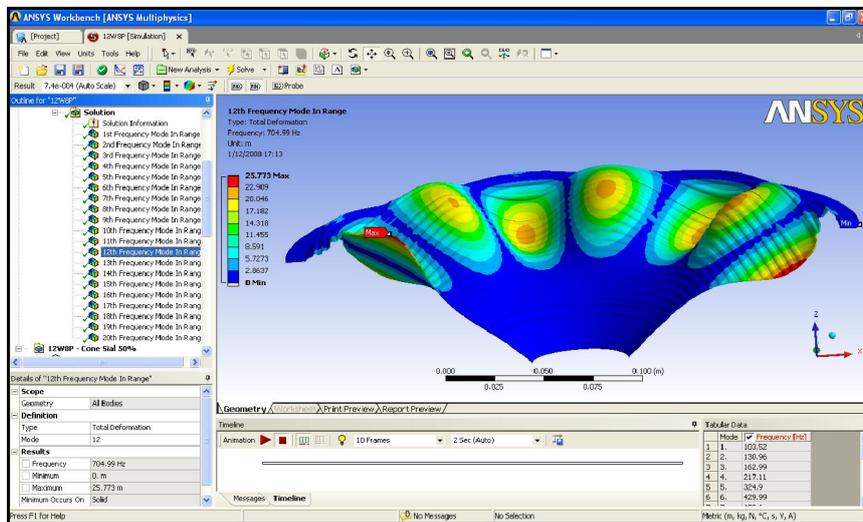


Figura 56 – 12º Modo de Vibração.

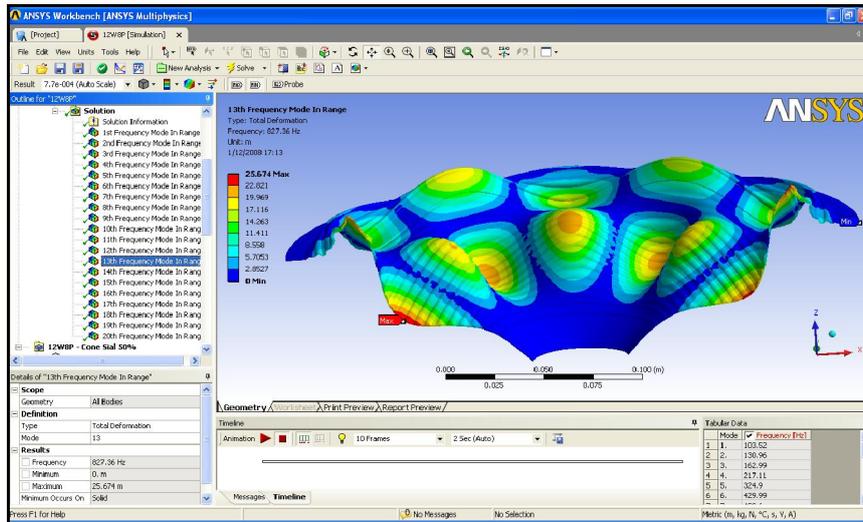


Figura 57 – 13º Modo de Vibração.

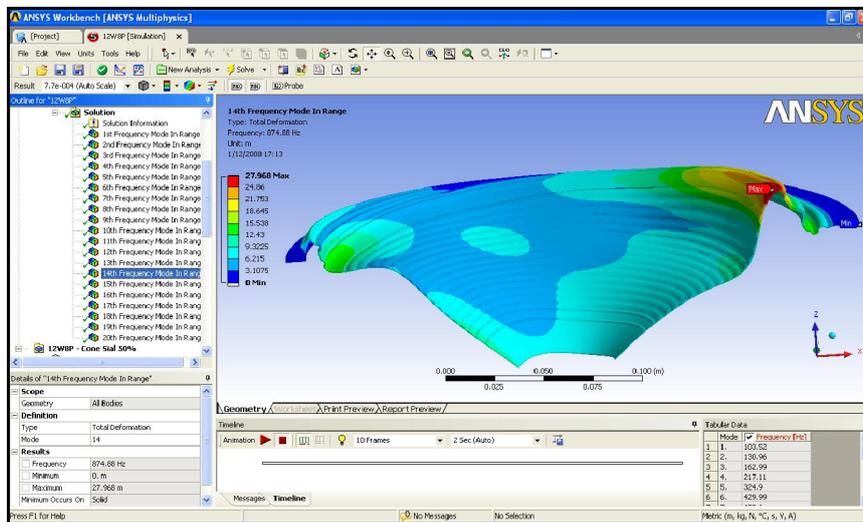


Figura 58 – 14º Modo de Vibração.

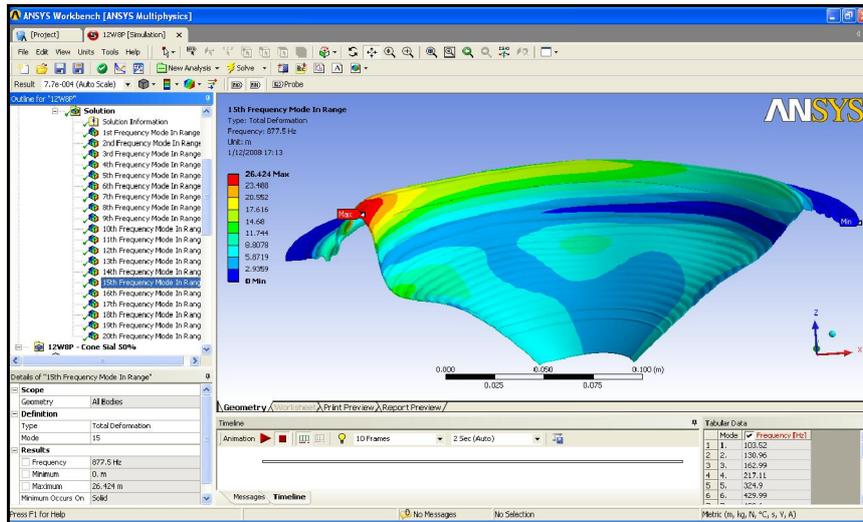


Figura 59 – 15º Modo de Vibração.

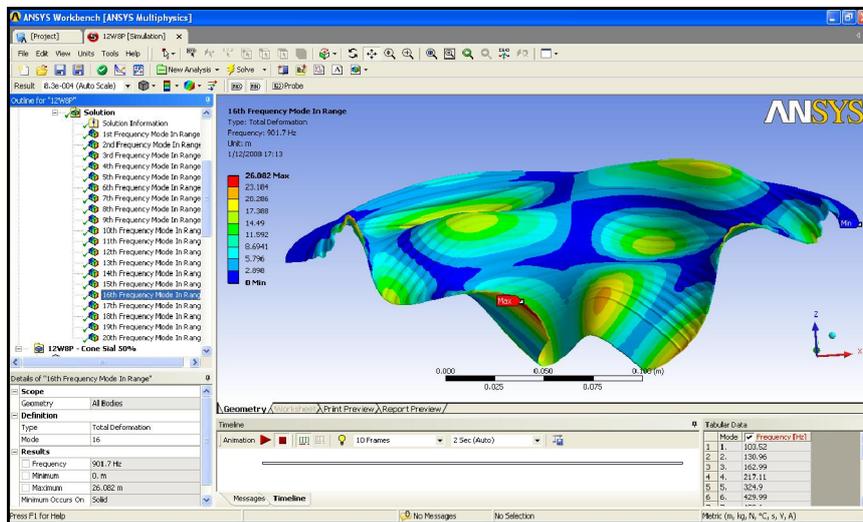


Figura 60 – 16º Modo de Vibração.

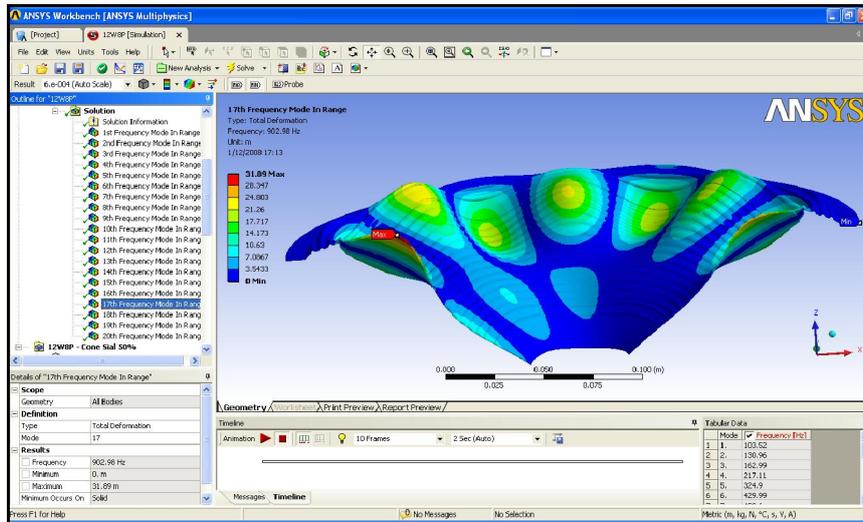


Figura 61 – 17º Modo de Vibração.

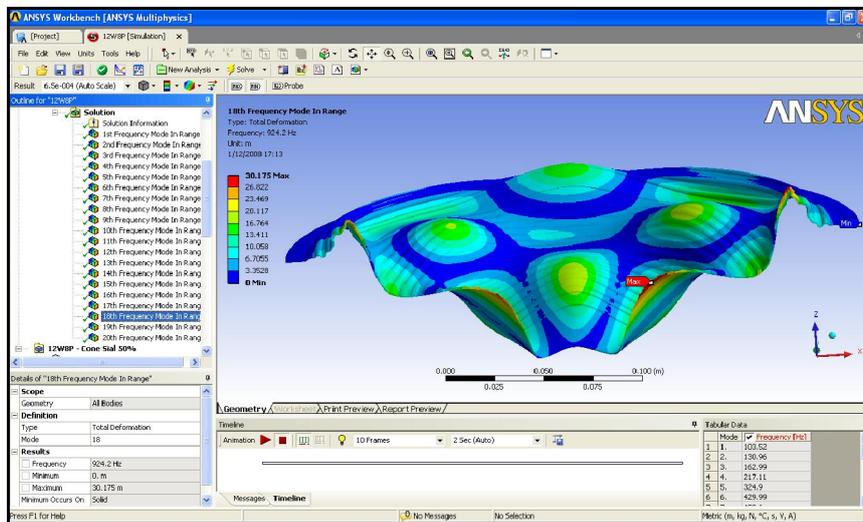


Figura 62 – 18º Modo de Vibração.

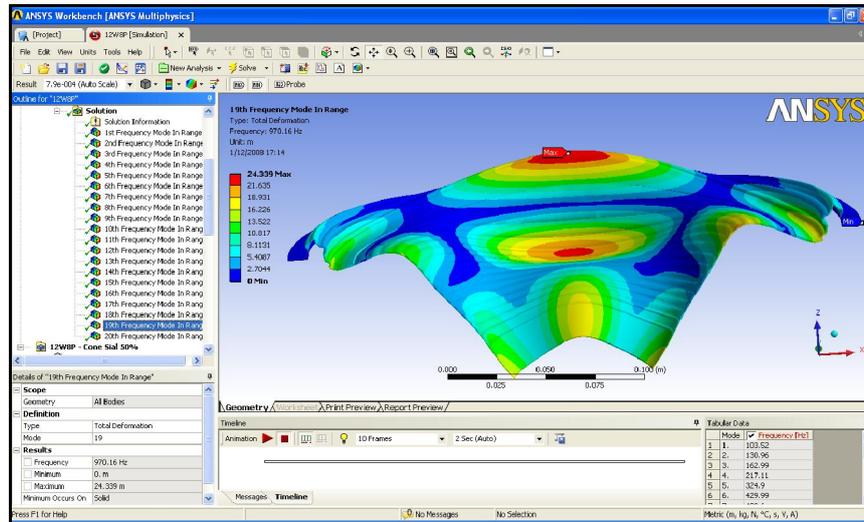


Figura 63 – 19º Modo de Vibração.

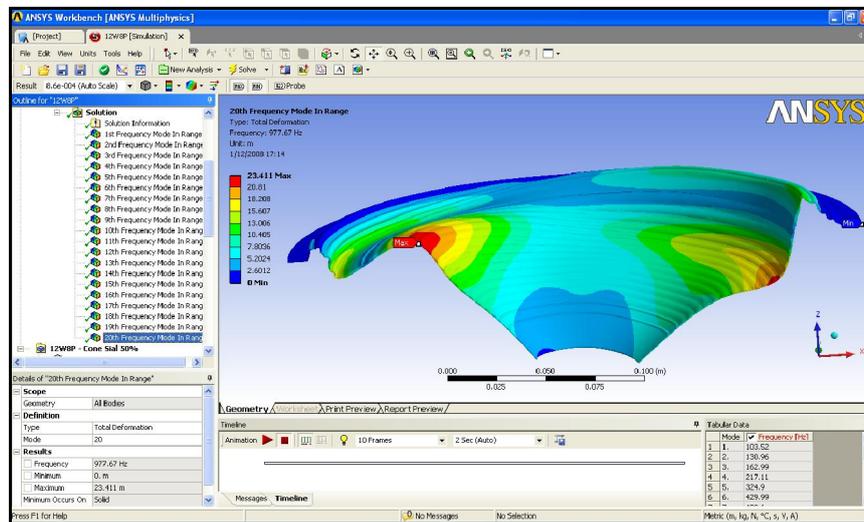


Figura 64 – 20º Modo de Vibração.