

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Relatório Parcial
Trabalho de Conclusão de Curso !!

Estudo e Modelamento de um Steel Tongue Drum

Autor: **ANDRÉ SBROCCO FIGUEIREDO**
Orientador: **PROF. DR. FLÁVIO DE CAMPOS BANNWART**

- Campinas –
2º semestre de 2018

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Relatório Parcial
Trabalho de Conclusão de Curso !!

Estudo e Modelamento de um Steel Tongue Drum

Autor: **ANDRÉ SBROCCO FIGUEIREDO**

Orientador: **PROF. DR. FLÁVIO DE CAMPOS BANNWART**

Curso: Engenharia Mecânica

Trabalho de Conclusão de Curso I apresentado à Comissão de Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Campinas, 2018

S.P. – Brasil

1. Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

Meus pais, por me presentear com o instrumento musical objeto de estudo deste trabalho. Sem eles, nada teria sido possível.

Ao Prof. Dr. Flávio De Campos Bannwart por me orientar neste trabalho.

Ao técnico do laboratório do Departamento de Mecânica Computacional (DMC) da UNICAMP, Fernando por me auxiliar no preparo e realização do experimento.

2. Sumário

Estudo e Modelamento de um Steel Tongue Drum.....	1
Estudo e Modelamento de um Steel Tongue Drum.....	i
1. Agradecimentos.....	ii
2. Sumário.....	iii
3. Resumo.....	1
Lista de Figuras.....	2
Lista de Tabelas.....	4
4. Introdução.....	5
5. Revisão Bibliográfica.....	7
6. Desenvolvimento.....	11
A - Simulação Modal.....	12
B – Ensaio acústico utilizando microfone de celular.....	20
Resultados e Discussões – Etapas A e B.....	26
C - Refinamento da simulação modal.....	27
D – Ensaio Acústico em Câmara Anecoica.....	40
Resultados e Discussões – Etapas C e D.....	46
7. Conclusões.....	48
8. Referências Bibliográficas.....	49

3. Resumo

Durante o desenvolvimento deste trabalho, o graduando estudou o comportamento acústico de um Steel Tongue Drum, instrumento musical cujo princípio de funcionamento é a vibração de uma estrutura metálica. Algumas abordagens foram feitas para modelar sua vibração utilizando auxílio de ferramentas computacionais. Para validar o modelo proposto, o instrumento musical foi ensaiado em uma câmara anechoica, executando uma varredura de senos para caracterização de sua resposta em frequência. O resultado experimental foi comparado ao teórico.

Palavras Chave: Acústica, Modos de Vibração, Instrumento Musical, Simulação Modal.

Lista de Figuras

Figura 1 - Handpan.....	5
Figura 2 - Steel Tongue Drum.....	5
Figura 3 - Modos de se tocar um HandPan. Fonte: [1].....	7
Figura 4 - Interferometria Holográfica de um HandPan. Fonte: [1].....	8
Figura 5 - Ressonador Helmholtz, onde S é a área da abertura da cavidade, L é o comprimento do pescoço, e V é o Volume da cavidade. Adaptado de [4], p. 14, Fig 1.7.....	8
Figura 6 - Abertura da cavidade com o meio, indicada em vermelho. Fonte: Autoral.	9
Figura 7 – Evolução da geometria das fendas de violinos ao longo dos séculos, e sua relação com a condutância acústica. Fonte: [5].....	10
Figura 8 - Velocidade do fluido para diversas geometrias de fenda submetidas a uma diferença de pressão. Fonte: [5].....	10
Figura 9 - Medição de espessura feita pelo furo onde passa os fios de captação elétrica, na base do instrumento. Fonte: Autoral.....	12
Figura 10 - Renderização do CAD feito com medições manuais. Fonte: Autoral.....	13
Figura 11 - Detalhes do comando MidSurf.....	13
Figura 12 - Malha para simulação modal.....	14
Figura 13 - à esquerda, elemento com baixo skewness. à direita, elemento com alto skewness.....	15
Figura 14 - Condição de contorno para a simulação (fixação na base).....	16
Figura 15 - Deformações de cada modo de vibração. Fonte: Autoral.....	18
Figura 16 - Identificação de cada lingueta. Fonte: Autoral	19
Figura 17 - Posicionamento do celular durante o ensaio acústico. Fonte: Autoral....	20
Figura 18 - Áudio importado para o software Audacity. Fonte: Autoral.....	21
Figura 19 - Espectrograma da lingueta 1. Fonte: Autoral.....	21
Figura 20 - Spectrograma da lingueta 9. Fonte: Autoral.....	22
Figura 21 - Presença de frequências principais em outras.....	23
Figura 22 - Segundo ensaio qualitativo: Fita crepe nas linguetas vizinhas. Fonte: Autoral.....	23
Figura 23 – Tempo de duração do som emitido por cada lingueta. Fonte: Autoral...25	25
Figura 24 - Comparação dos resultados obtidos via experimento e simulação. Fonte: Autoral.....	26
Figura 25 - Posicionamento da câmera em cada foto para o escaneamento. Fonte: Autoral.....	27

Figura 26 - Correção de escala para o escaneamento. Fonte: Autoral.....	28
Figura 27 - Visualização da malha gerada. Fonte: Autoral.....	28
Figura 28 - Malha escaneada importada ao Creo Parametric. Fonte: Autoral.....	29
Figura 29 - CAD sobre a malha escaneada.....	29
Figura 30 - Comparação da geometria feita a partir da malha escaneada com a geometria feita a partir de medições manuais.....	30
Figura 31 - Renderização do CAD final. Fonte: Autoral.....	30
Figura 32 - Processo de repuxo para conformação da chapa. Fonte: [7].....	31
Figura 33 - Relação de variação de espessura durante processo de repuxo. Fonte: [8].....	32
Figura 34 - Ângulos entre os vetores normais à superfície e o eixo de simetria do instrumento. Fonte: Autoral.....	32
Figura 35 - Ângulo de repuxo em função da distância ao plano de simetria vertical. Fonte: Autoral.....	33
Figura 36 - Curva de espessura parametrizada no software para simulação modal.Fonte: Autoral.....	33
Figura 37 - Formas modais relativas às frequências até 950 Hz.....	37
Figura 38 - Comparação entre as simulações modais e a aquisição do microfone. Fonte: Autoral.....	39
Figura 39 - Suporte para apoio do instrumento. Fonte: Autoral.....	40
Figura 40 - Shaker e célula de carga utilizados no ensaio. Fonte: Autoral.....	40
Figura 41 - Posição do Shaker no ensaio. Fonte: Autoral.....	41
Figura 42 - Preamplificador e microfone utilizados no ensaio. Fonte: Autoral.....	41
Figura 43 - Setup do ensaio. Fonte: Autoral.....	42
Figura 44 - Interface LMS utilizada para realização do experimento. Fonte: Autoral.....	42
Figura 45 - Setup para varredura de senos. Fonte: Autoral.....	43
Figura 46 - Diagrama de Bode da FRF Mic/Force na região de interesse 150Hz a 525 Hz. Fonte: Autoral.....	44
Figura 47 - Diagrama de Nyquist da FRF Mic/Force. Fonte: Autoral.....	45
Figura 48 – Gráfico comparativo dos resultados obtidos experimentalmente e através da simulação modal. Fonte: Autoral.....	47

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Critério de qualidade dos elementos da malha.....	15
Tabela 2 - Linguetas com maior deslocamento para cada frequência.....	19
Tabela 3 - Aquisições do microfone. Fonte: Autoral.....	22
Tabela 4 - Aquisições do microfone – fita crepe nas linguetas vizinhas. Fonte: Autoral.....	24
Tabela 5 – Frequências de cada modo. Fonte: Autoral.....	38
Tabela 6 - Frequencias naturais associadas a cada lingueta. Fonte: Autoral.....	39
Tabela 7 - Frequências encontradas no diagrama de Nyquist. Fonte: Autoral.....	45
Tabela 8 – Tabela comparativa dos resultados obtidos experimentalmente e através da simulação modal. Fonte: Autoral.....	46

4. Introdução

O Handpan é um termo para um grupo de instrumentos musicais, resultante de um crescente interesse mundial no Hang, um instrumento inventado e construído pela empresa suíça PANArt Hangbau AG, nos anos 2000. O instrumento mais popular inventado por essa empresa é o Hangdrum, mostrado a seguir. Este instrumento, assim como seu nome “Hangdrum”, são patentes da empresa, e portanto será referido neste trabalho como Handpan.



Figura 1 - Handpan

Com sua crescente popularidade, surgiram alternativas mais baratas e que não infrinjissem a propriedade intelectual, como por exemplo o “Steel tongue drum” / “Tank drum” / “Hank drum” (Figura 2).



Figura 2 - Steel Tongue Drum

Como o aparecimento desse instrumento é muito recente, não há uma definição concreta do seu nome, pois cada empresa que fabrica algo parecido, tenta lançar sua marca no mercado. Se essa indefinição de nomenclatura ainda acontece na língua inglesa, não há tradução desses nomes para o português. Portanto, neste trabalho, esse instrumento será referido como “Steel Tongue Drum”.

O seu princípio de funcionamento é produzir ondas sonoras a partir da vibração de suas linguetas. Dependendo da geometria e do material, sua excitação produzirá sons diferentes. O presente trabalho terá como objetivo modelar o instrumento e validar este modelo experimentalmente, gerando uma metodologia/ferramenta que possivelmente auxiliará no seu desenvolvimento e sua produção com melhor qualidade sonora.

5. Revisão Bibliográfica

O Steel Tongue Drum é um instrumento novo, e portanto há um número menor de estudos publicados na literatura. Entretanto, seu “irmão mais velho”, HandPan, já é um instrumento muito mais estudado, com princípio de funcionamento similar. Estes trabalhos serão utilizados como referência, a fim de entender as metodologias utilizadas e reproduzi-las no Steel Tongue Drum, com as devidas adaptações.

O princípio de funcionamento de qualquer instrumento musical é a vibração de alguma de suas partes. No caso do HandPan, deve-se utilizar as mãos para bater em pontos específicos de sua estrutura, gerando uma vibração localizada que reproduzirá uma nota [1]. A maioria das notas soam pelo menos 3 harmônicas da nota principal [2].



Figura 3 - Modos de se tocar um HandPan. Fonte: [1]

Utilizando interferometria holográfica, é possível mapear os modos de vibração associados a cada frequência de excitação. Utilizando um shaker acoplado ao instrumento, é possível varrer todas as frequências audíveis procurando ressonâncias com a estrutura. O resultado pode ser observado na figura 4 [1].

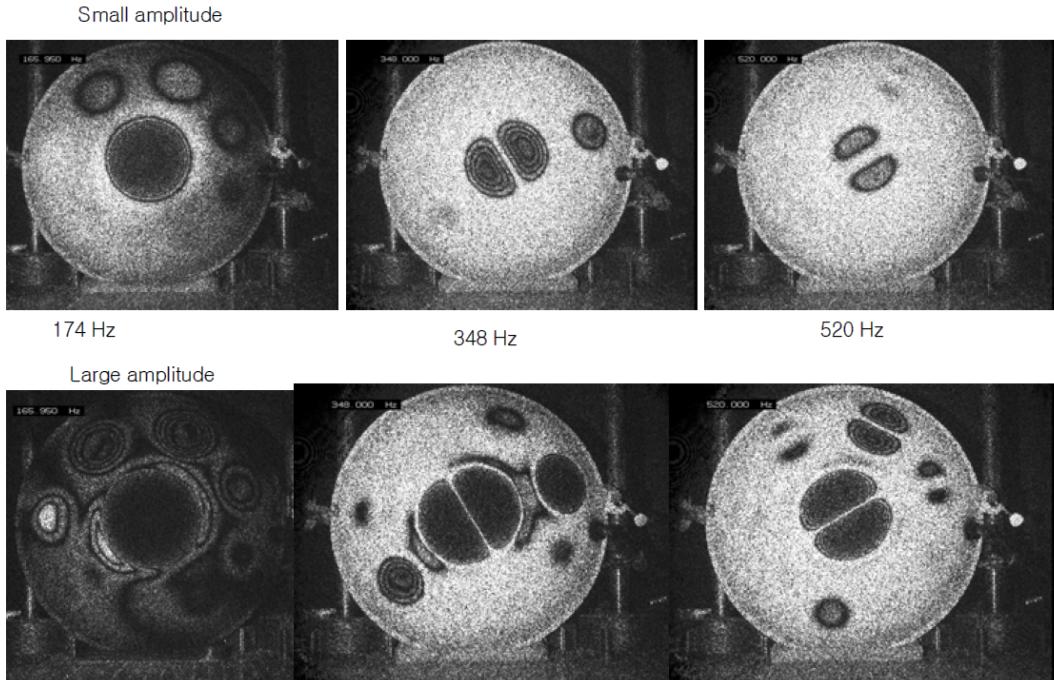


Figura 4 - Interferometria Holográfica de um HandPan. Fonte: [1]

No caso do HandPan, os modos de vibração e as suas respectivas frequências são função de sua estrutura (geometria e material) e da cavidade de ar (geometria e fluido). A interação entre a estrutura e a cavidade age como um ressonador de Helmholtz [3].

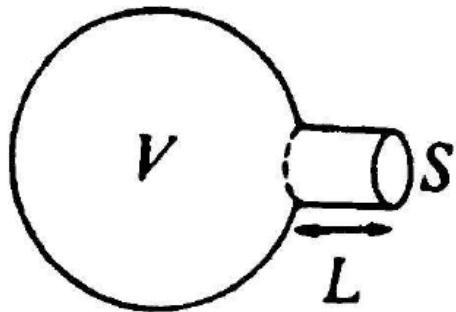


Figura 5 - Ressonador Helmholtz, onde S é a área da abertura da cavidade, L é o comprimento do pescoço, e V é o Volume da cavidade. Adaptado de [4], p. 14, Fig 1.7

No caso do Steel Tongue Drum, este modelamento de interação com a cavidade não é válido, pois a abertura para o ambiente não é localizada, e sim distribuída ao longo do perímetro de corte de cada lingueta, conforme ilustrado em vermelho na figura 6. Dessa maneira, o efeito de ressonância é minimizado, e um novo modelo de acoplamento com a cavidade deve ser proposto.



Figura 6 - Abertura da cavidade com o meio, indicada em vermelho. Fonte: Autoral

Sem o efeito de ressonância do acoplamento com a cavidade, o comportamento acústico será majoritariamente regido pela estrutura, hipótese que foi explorada na primeira etapa deste trabalho.

Observa-se que o ar da cavidade é conectado ao meio externo através de fendas estreitas, o que é similar aos violinos. De acordo com [5], a evolução da geometria da fenda ao longo dos séculos se deu de maneira experimental, progredindo para instrumentos com maior condutância acústica da fenda, o que resulta em uma maior potência sonora.

Tal estudo mostrou que a condutância de uma fenda é linearmente proporcional ao seu perímetro, conforme ilustrado na figura 8.

$$C = \alpha * L$$

Onde α = fator de forma, L = perímetro.

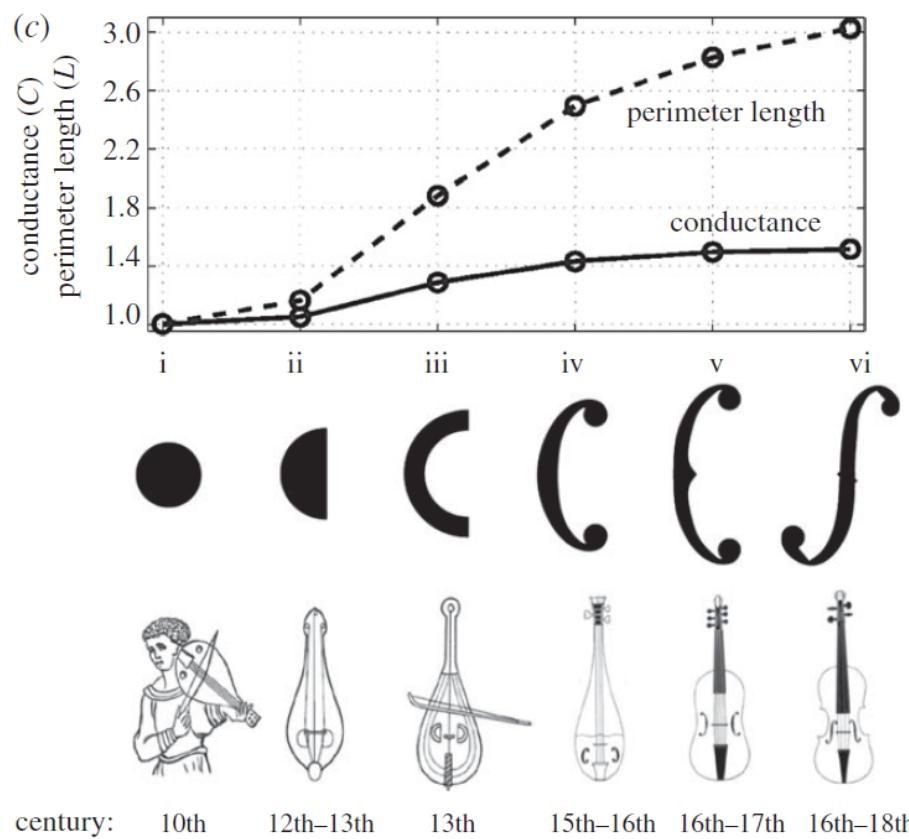


Figura 7 – Evolução da geometria das fendas de violinos ao longo dos séculos, e sua relação com a condutância acústica. Fonte: [5]

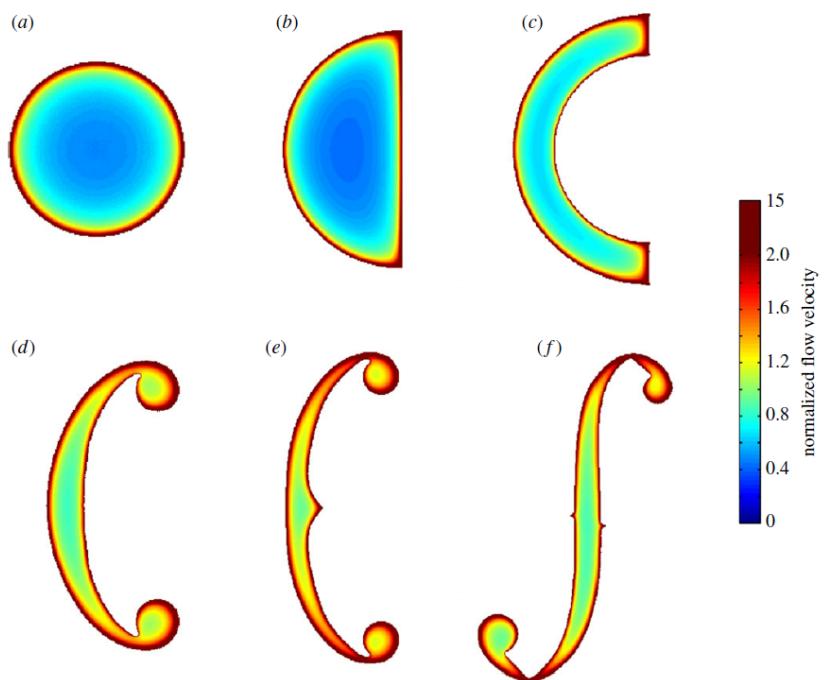


Figura 8 - Velocidade do fluido para diversas geometrias de fenda submetidas a uma diferença de pressão.
Fonte: [5]

6. Desenvolvimento

A partir da literatura encontrada, supõe-se que o comportamento acústico do Steel Tongue Drum seja majoritariamente regido pelas características vibratórias da estrutura, sofrendo pouca influência da interação com o meio. Na prática, as frequências e os modos de vibração encontrados na simulação modal do instrumento devem coincidir com as notas de cada lingueta. Para testar essa hipótese, foi executado a primeira etapa da pesquisa, que consistiu de duas frentes:

- A.** Simulação modal com elementos finitos
- B.** Ensaio acústico utilizando microfone de celular.

Ao final dessa etapa, os resultados foram comparados e discutidos. Como foi constatado uma boa correlação, ambas frentes foram refinadas, o que consistiu a segunda etapa do trabalho:

- C.** Refinamento da simulação modal
- D.** Ensaio acústico em câmara anecoica.

Por fim, os resultados finais foram discutidos, assim como as possíveis fontes de erro e propostas para saná-los e dar continuidade à pesquisa.

A - Simulação Modal

A equação de movimento para a vibração livre de um sistema não amortecido pode ser expressa em forma matricial, como:

$$[M] \cdot \ddot{\vec{X}} + [K] \cdot \vec{X} = \vec{0}$$

Onde $[K]$ é a matriz de rigidez e $[M]$ é a matriz de massa. Para encontrar a solução da equação por análise modal, é necessário resolver o problema de autovalor:

$$\omega^2 \cdot [M] \cdot \vec{X} = [K] \cdot \vec{X}$$

Onde ω são as frequências modais, e \vec{X} são as formas associadas. [9] Devido à alta complexidade da geometria do Steel Tongue Drum, os cálculos para encontrar as matrizes de parâmetros físicos do sistema, assim como os modos e frequências de vibração serão feitos com o auxílio do software Ansys Workbench® Acadêmico.

As medidas para desenhar o CAD do instrumento foram feitas com fita métrica e paquímetro, e micrômetro, mas devido à sua geometria irregular, erros de medição são evidentes. Observou-se uma notável variação de espessura em torno do furo de acesso, com média de 0,98mm e desvio padrão de 0,09mm. Este fato será discutido na etapa C.



Figura 9 - Medição de espessura feita pelo furo onde passa os fios de captação elétrica, na base do instrumento. Fonte: Autoral.

Apesar das dificuldades de medição, o resultado foi satisfatório para um estudo qualitativo.

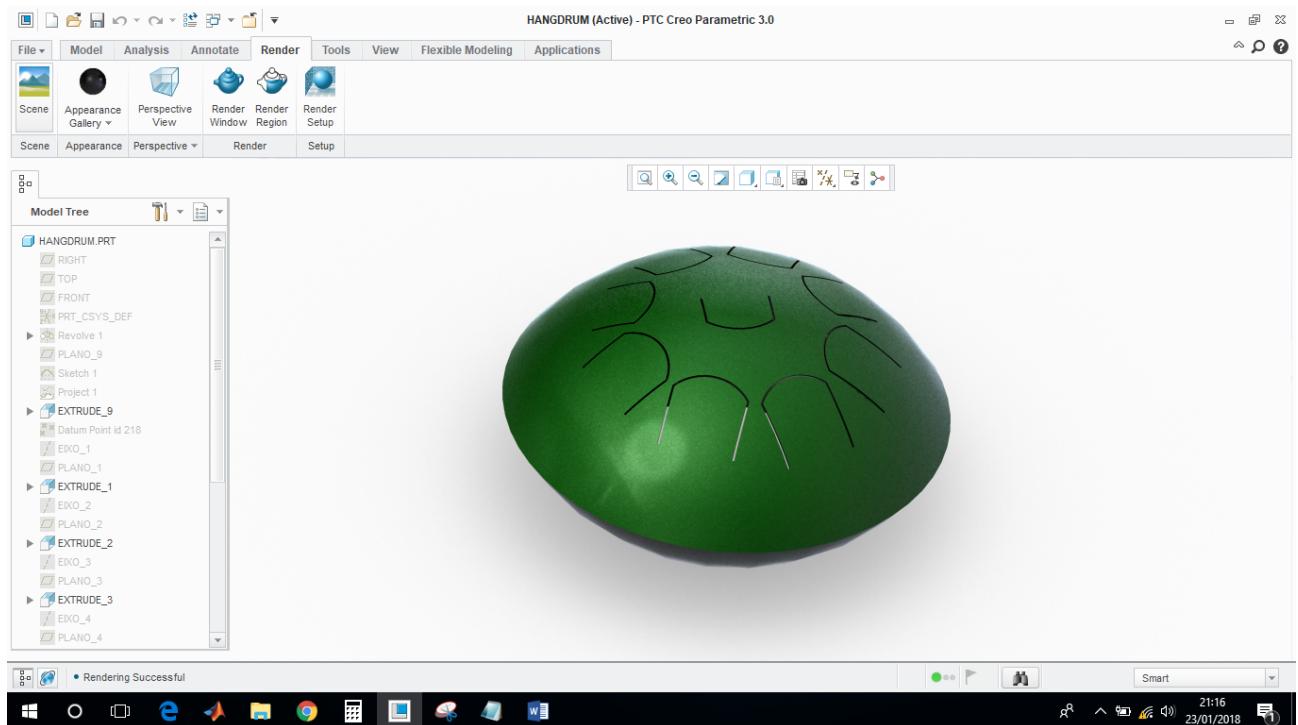


Figura 10 - Renderização do CAD feito com medições manuais. Fonte: Autoral

Este modelo CAD foi importado para o software Ansys Workbench® Acadêmico. Primeiramente o modelo foi simplificado para uma superfície a fim de melhorar a qualidade da malha e reduzir o custo computacional, utilizando o comando “Midsurf”.

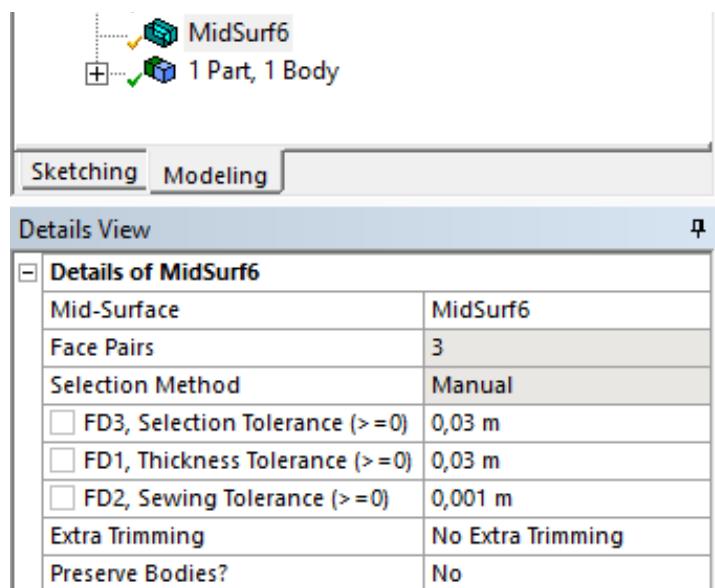


Figura 11 - Detalhes do comando MidSurf

Em seguida, foram criados arestas nas regiões de maior deformação, para que se possa refinar a malha.

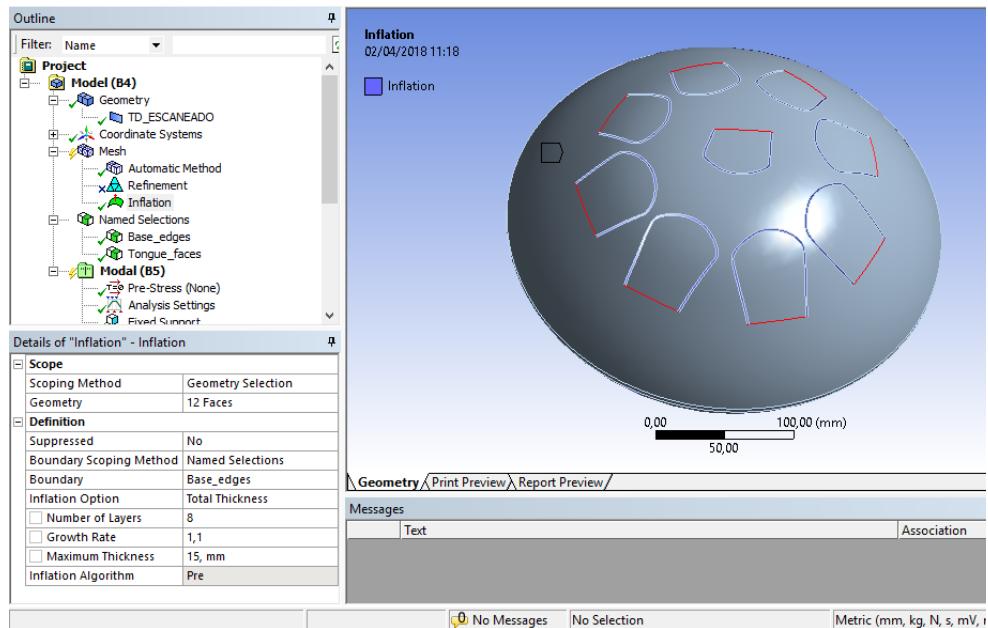


Figura 12 - Arestas para aplicação do comando "inflation". Fonte: Autoral.

Os parâmetros utilizados para gerar a malha foram:

- Element Size: 4mm;
- Method: Quadrilateral Dominant;
- Inflation nas arestas de interesse: 8 camadas, growth rate = 1,1, maximum thickness = 15mm;

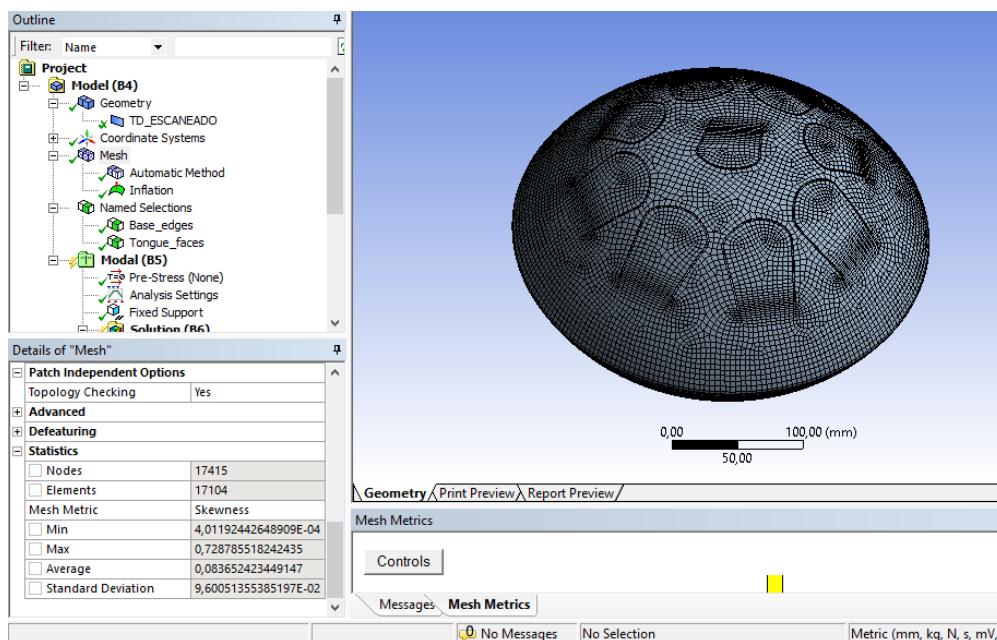


Figura 13 - Malha para simulação modal

Após gerar a malha, observa-se o critério de qualidade dos elementos. A principal medida de qualidade é o “skewness”, uma medida de assimetria de cada elemento. Quanto mais assimétrico, maior a propagação de erros numéricos durante a simulação.

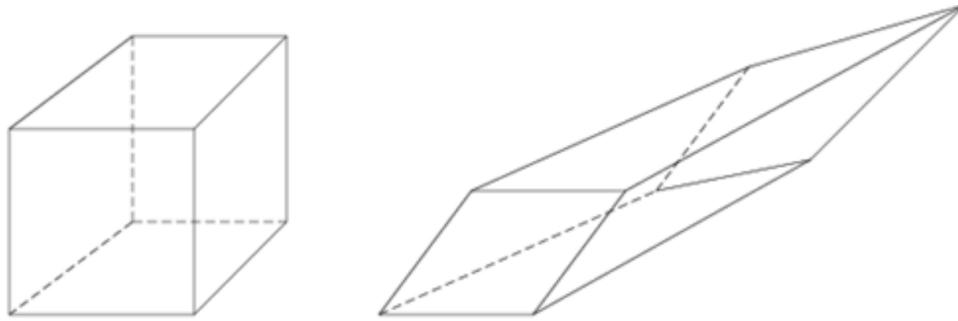


Figura 14 - à esquerda, elemento com baixo skewness. à direita, elemento com alto skewness

Constata-se que a média de “skewness” é 0,0837 com desvio padrão de 0,096 ou seja, de acordo com o critério da tabela 1 99,999% dos elementos da malha tem boa qualidade (skewness abaixo de 0,5).

Tabela 1 - Critério de qualidade dos elementos da malha

Skewness	Cell Quality
1	Degenerate
0,9 - < 1	Bad (sliver)
0,75 – 0,9	Poor
0,5 – 0,75	Fair
0,25 – 0,5	Good
>0 – 0,25	Excellent
0	Equilateral

Aplica-se a fixação na superfície inferior do instrumento (como se ele estivesse apoiado em uma mesa, por exemplo).

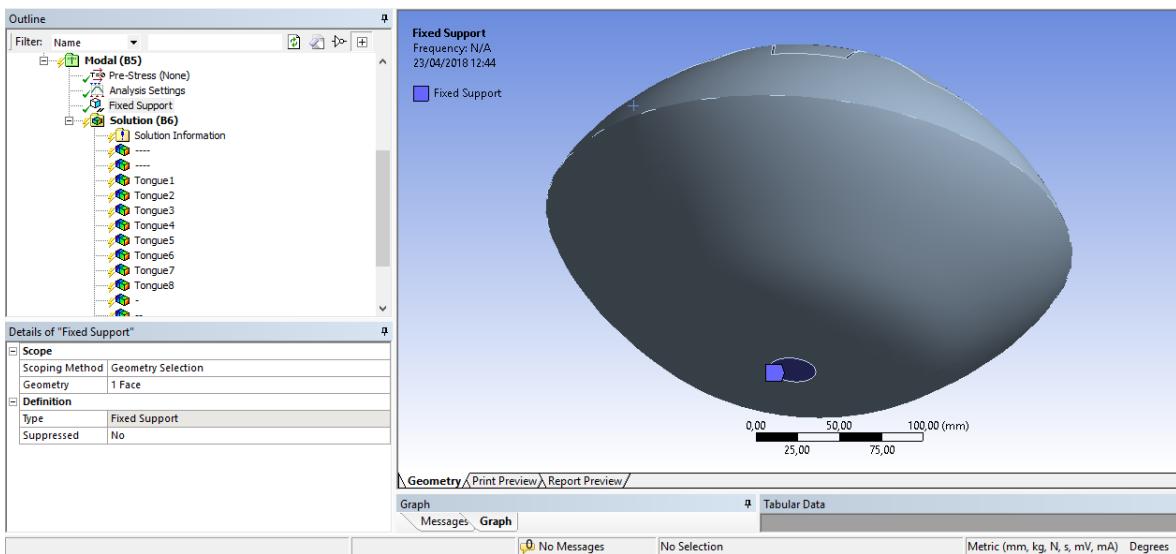
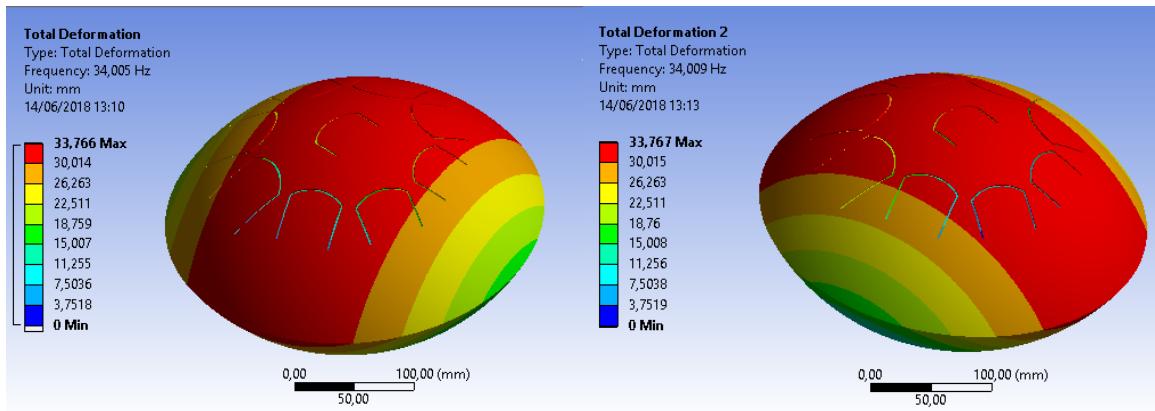


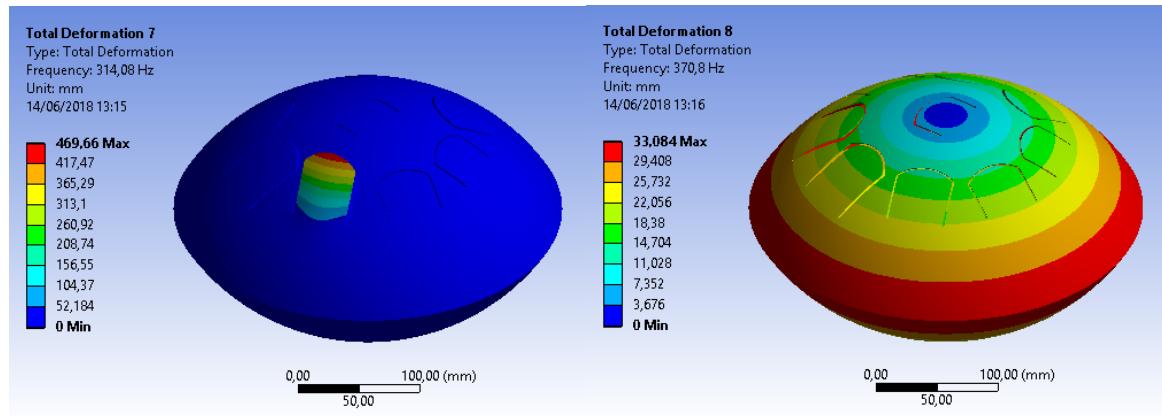
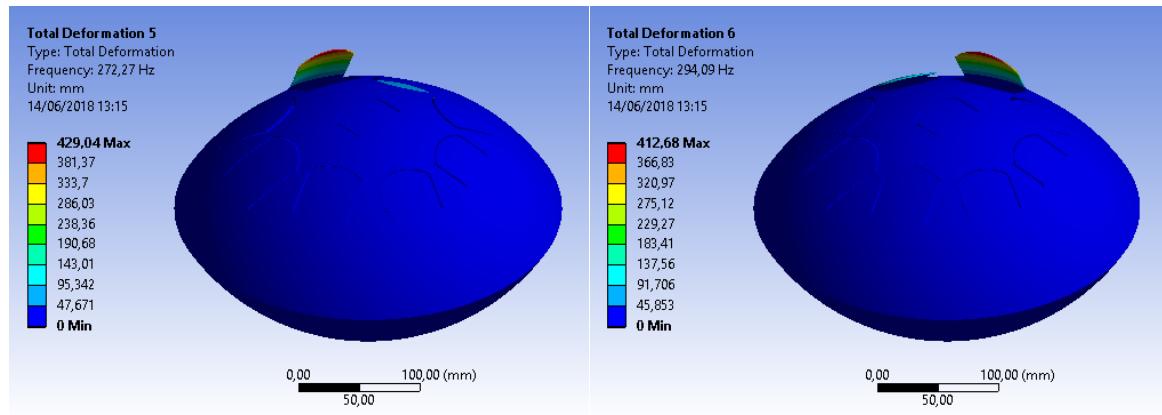
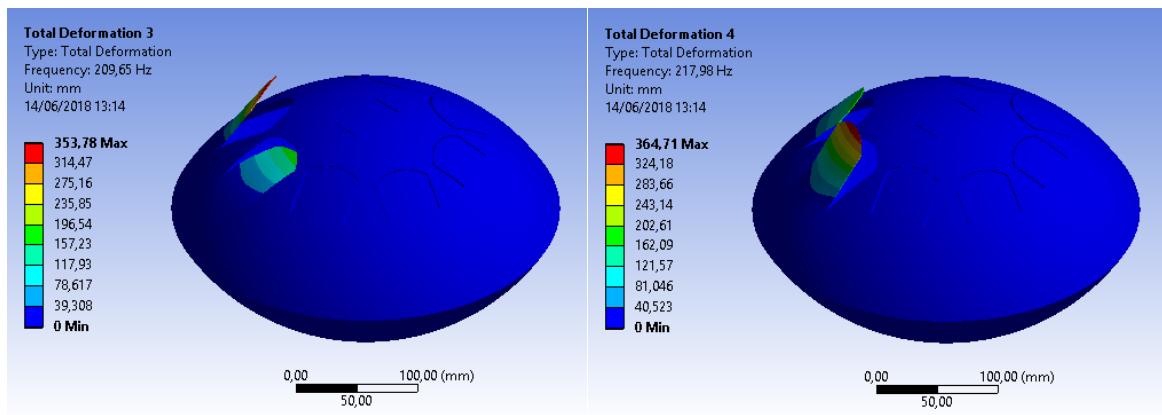
Figura 15 - Condição de contorno para a simulação (fixação na base)

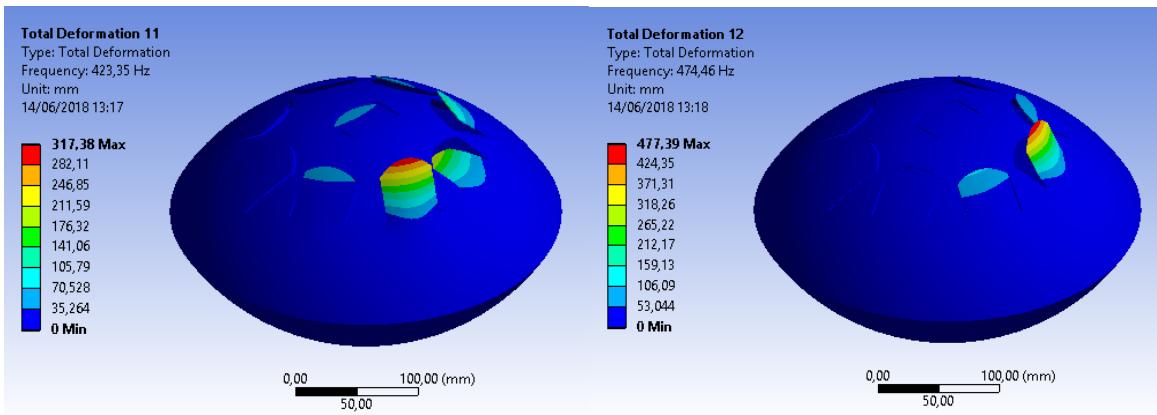
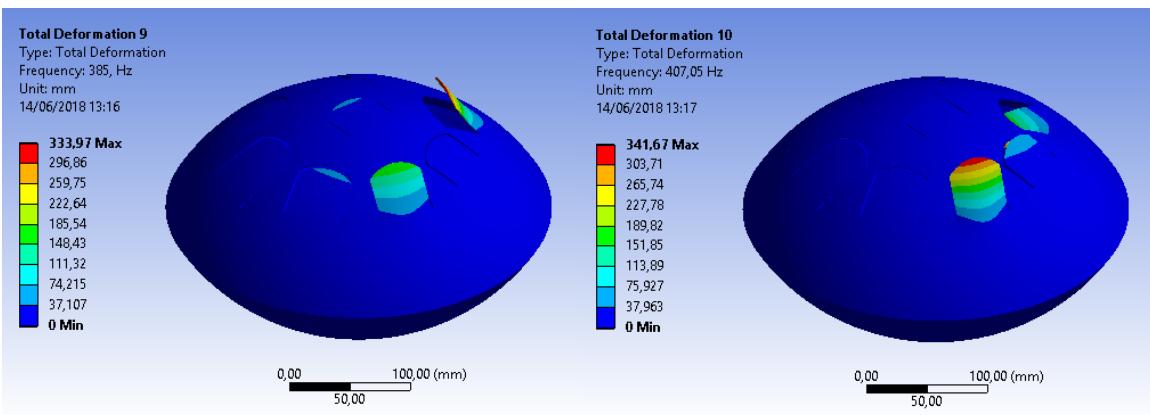
As propriedades do aço utilizadas foram:

- $E = 200 \text{ Gpa}$;
- Coeficiente de Poisson = 0.3;

Os resultados de deslocamentos para cada modo de vibração são mostrados abaixo:







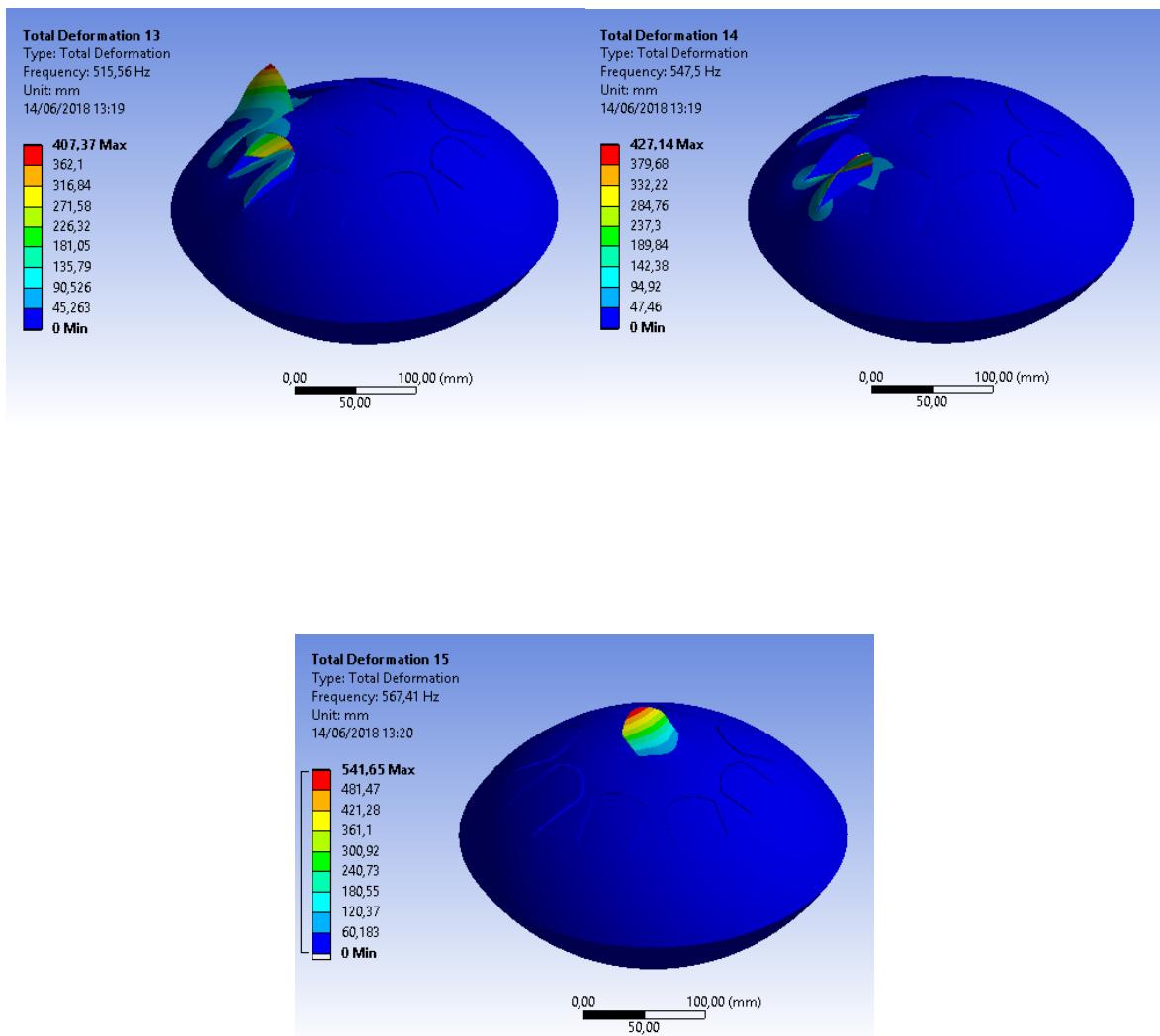


Figura 16 - Deformações de cada modo de vibração. Fonte: Autoral.

Para melhor análise, cada lingueta será identificada por um número, como mostrado na figura 17. A ordem dos números segue a ordem das frequências, começando pela mais baixa, até a mais alta.



Figura 17 - Identificação de cada lingueta. Fonte: Autoral .

Observa-se que os dois primeiros modos de vibração são associados ao movimento do corpo todo pivotando em seu ponto de apoio, portanto a frequência associada não representa nenhuma nota do instrumento. Para cada modo, observou-se qual lingueta apresentava maior deslocamento, resultado sumarizado na tabela 2.

Tabela 2 - Linguetas com maior deslocamento para cada frequência

Lingueta	Frequências (Hz)
1	209,7
2	272,3
3	218,0
4	294,0
5	314,1
6	385,0
7	407,1
8	474,5
9	576,4

Deve ser ressaltado que alguns modos de vibração envolvem o deslocamento de mais de uma lingueta, mas para fins qualitativos, esse efeito será descartado. Ao fim do trabalho, essa simplificação será discutida, assim como uma metodologia melhor para levar esse comportamento em conta.

B – Ensaio acústico utilizando microfone de celular

Como a primeira etapa tem um caráter qualitativo, o ensaio acústico foi feito de maneira rápida com baixo custo operacional: o local escolhido foi um quarto fechado, e os testes foram feitos de madrugada, período com menor ruído externo. O celular foi posicionado 20cm acima do instrumento, em uma posição fixa durante todo o ensaio conforme a figura 18. Cada nota do instrumento foi tocada 4 vezes consecutivamente, com intervalo de 5 segundos entre si, tempo necessário para que o som seja completamente dissipado antes da próxima batida.



Figura 18 - Posicionamento do celular durante o ensaio acústico. Fonte: Autoral.

Os dados foram importados para o software Audacity (figura 19), onde foi possível fazer uma primeira análise dos sinais.

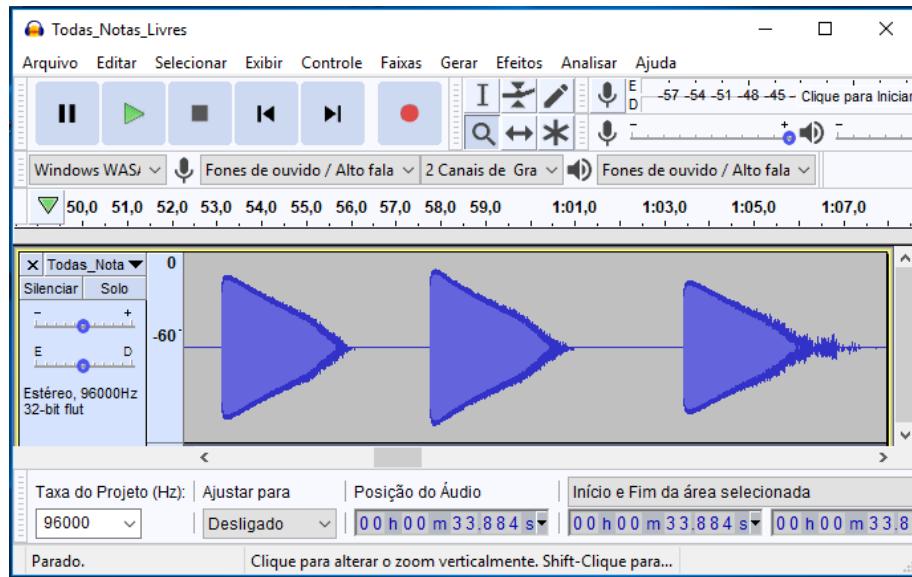


Figura 19 - Áudio importado para o software Audacity. Fonte: Autoral.

Utilizando a ferramenta de análise de espectrograma, é possível encontrar as frequências de vibração dominantes quando cada lingueta é excitada (Figura 5). O tamanho da amostra foi escolhido de maneira a obter melhor resolução sem que haja perda de informação. O tipo de janelamento escolhido foi “Blackman-Harris”, pois os lóbulos laterais são suprimidos [6]. Na literatura, ela é tratada como “general-purpose window”.

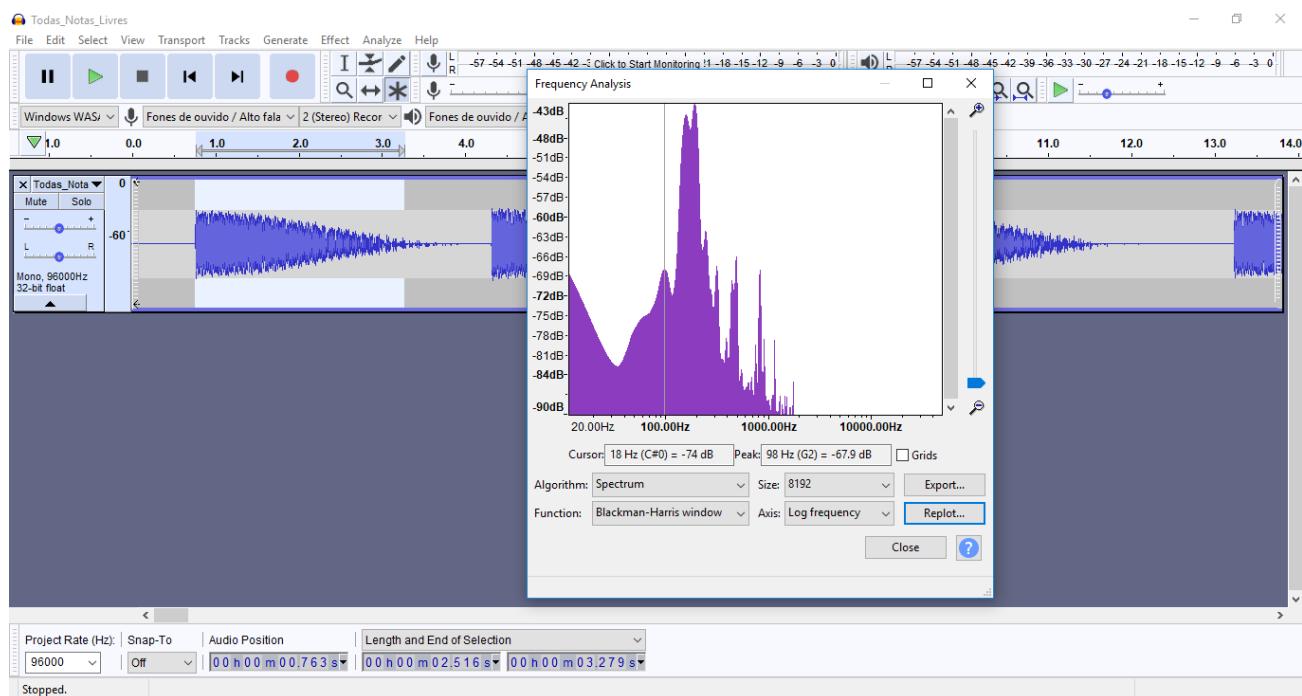


Figura 20 - Espectrograma da lingueta 1. Fonte: Autoral.

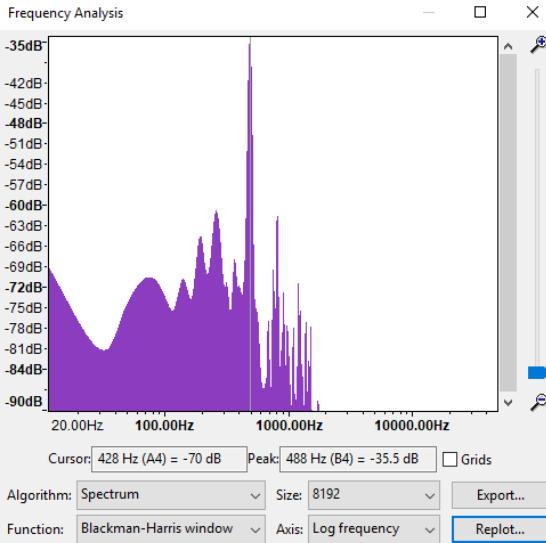


Figura 21 - Spectrograma da lingueta 9. Fonte: Autoral.

Para cada lingueta, observa-se um conjunto de frequências predominantes no espectro. As frequências com maior amplitude foram anotadas em uma planilha para posterior análise, assim como a duração do som emitido por cada nota. Repetindo o procedimento para cada uma das 9 linguetas do instrumento, obtém-se a tabela 3:

Tabela 3 - Aquisições do microfone. Fonte: Autoral.

Lingueta	Aquisição 1			Aquisição 2			Aquisição 3			Aquisição 4			Aquisição 6			Média		
	Freq. (Hz)	Amp. (dB)	Dur. (s)															
1	158	-45	2,63	158	-44	2,76	158	-45	2,69	158	-44	2,68				158	-44,4	2,69
	193	-43		193	-42		194	-44		193	-43					193	-42,9	
2	184	-36	2,99	184	-35	2,99	184	-36	2,9							184	-35,5	2,96
	247	-45		247	-40		247	-44								247	-42,7	
3	194	-28	3,71	194	-29	3,6	descartada									194	-28,2	3,65
	260	-48		261	-48											261	-47,7	
4	247	-23	2,81	247	-20	2,99	247	-25	2,93							247	-22,5	2,91
	183	-50		183	-48		183	-53								183	-50,3	
5	260	-24	2,76	261	-25	2,64	260	-24	2,74	261	-24	2,68				261	-24,1	2,70
	194	-39		194	-41		194	-40		194	-40					194	-40,2	
6	328	-34	2,28	328	-33	2,37	327	-33	2,24							328	-33,3	2,30
	247	-37		247	-35		247	-35								247	-35,8	
7	365	-44	1,7	368	-41	1,91	371	-39	1,95	370	-41	1,82	370	-42	1,74	369	-41,3	
	261	-47		261	-42		261	-42		261	-43		261	-45		261	-43,7	1,82
	194	-59		194	-55		194	-55		194	-56		194	-57		194	-56,3	
8	390	-35	1,86	390	-32	1,98	390	-33	2,07							390	-33,3	
	327	-48		327	-44		327	-45								327	-45,4	1,97
9	488	-36	2,19	488	-33	2,41	488	-34	2,33	488	-35	2,27				488	-34,1	
	260	-59		258	-59		267	-58		262	-61					262	-59,1	2,30
	195	-64		193	-62		193	-61		193	-63					194	-62,4	

Em geral, cada lingueta teve uma frequência predominante e outras de menor amplitude. Fazendo uma análise crítica sobre essa tabela, encontramos um certo padrão: a frequência predominante de algumas linguetas se encontram também na vibração de outras, com intensidade reduzida. Ou seja, algumas linguetas são excitadas pela vibração de suas vizinhas, pois são todas engastadas na mesma estrutura.

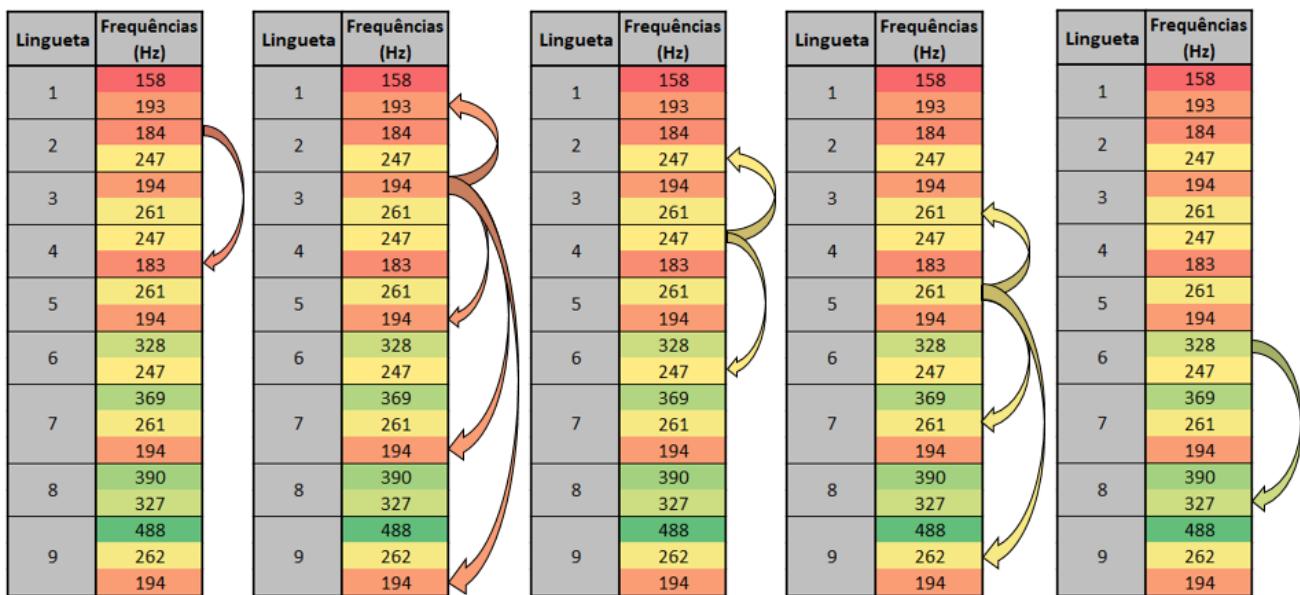


Figura 22 - Presença de frequências principais em outras

Essa constatação instigou a realização de um segundo ensaio. Com o instrumento e o microfone nas mesmas posições, foram realizados os mesmos ensaios, mas agora fixando as linguetas vizinhas com fita crepe, conforme a Figura 23.



Figura 23 - Segundo ensaio qualitativo: Fita crepe nas linguetas vizinhas. Fonte: Autoral.

Logo durante o ensaio, foi observado que a duração do som de algumas linguetas foi drasticamente reduzida. Os resultados dos espectrogramas estão sumarizados na tabela 3.

Tabela 4 - Aquisições do microfone – fita crepe nas linguetas vizinhas. Fonte: Autoral.

Lingueta	Aquisição 1			Aquisição 2			Aquisição 3			Aquisição 4			Aquisição 6			Média		
	Freq. (Hz)	Amp. (dB)	Dur. (s)															
1	160	-34	2,26	160	-32	2,38	159	-30	2,44	159	-29	2,48	159	-28	2,4	159	-30,6	2,39
2	184	-27	2,6	184	-27	2,62	184	-26	2,74	184	-26	2,72	183	-25	2,75	184	-26,0	2,68
3	194	-24	2,59	194	-24	2,53	194	-24	2,56	193	-23	2,54	193	-23	2,47	194	-23,5	2,54
				130	-61		127	-61		134	-60		131	-59		131	-60,3	
4	247	-25	1,87	246	-22	1,94	247	-23	1,94	247	-23	1,95	246	-22	1,89	247	-22,9	1,92
5	261	-30	1,35	260	-27	1,37	261	-30	1,31	261	-31	1,31	261	-36	1,3	261	-31,0	1,33
										130	-66					130	-66,4	
6	327	-36	0,73	327	-36	0,72	326	-33	0,74	325	-31	0,71				326	-33,9	0,72
	236	-62		236	-61		237	-58		238	-55					237	-59,2	
7	368	-40	0,76	367	-37	0,81	367	-35	0,81	368	-40	0,72	367	-36	0,74	367	-37,6	
	236	-67		235	-65		235	-62		234	-64		235	-61		235	-63,6	0,77
	129	-67		129	-66		130	-66		130	-64		131	-64		130	-65,4	
8	389	-43	0,6	388	-38	0,68	388	-37	0,67	388	-42	0,63				388	-40,0	
	236	-66		237	-61		237	-58		238	-56					237	-60,4	0,65
	130	-66		128	-64		130	-63		130	-60					130	-63,5	
9	488	-31	0,41	488	-32	0,38	487	-28	0,43	488	-28	0,44				488	-29,8	0,42

Nota-se que as linguetas 1, 2, 4 e 9 agora não apresentaram uma segunda frequência considerável em seu espectro. Observa-se também que as frequências de 130Hz e 237Hz não haviam aparecido em nenhum espectro no ensaio anterior, e agora são as únicas frequências “parasitas”.

Fazendo a relação de frequências com as respectivas notas musicais, obtemos a tabela 5. A nível de curiosidade, observa-se que as notas estão dentro da escala de mi menor (Em):

Tabela 5 - Frequências e notas correspondentes. Fonte: Autoral.

Lingueta	Frequências (Hz)	Nota musical
1	159	E2
2	184	F#2
3	194	G2
4	247	B2
5	261	C3
6	328	E3
7	369	F#3
8	390	G3
9	488	B3

Além das frequências associadas a cada lingueta, observamos o tempo de duração de cada nota em ambas situações: todas as linguetas livres vs todas as linguetas “tampadas” menos a excitada, conforme a figura 24.

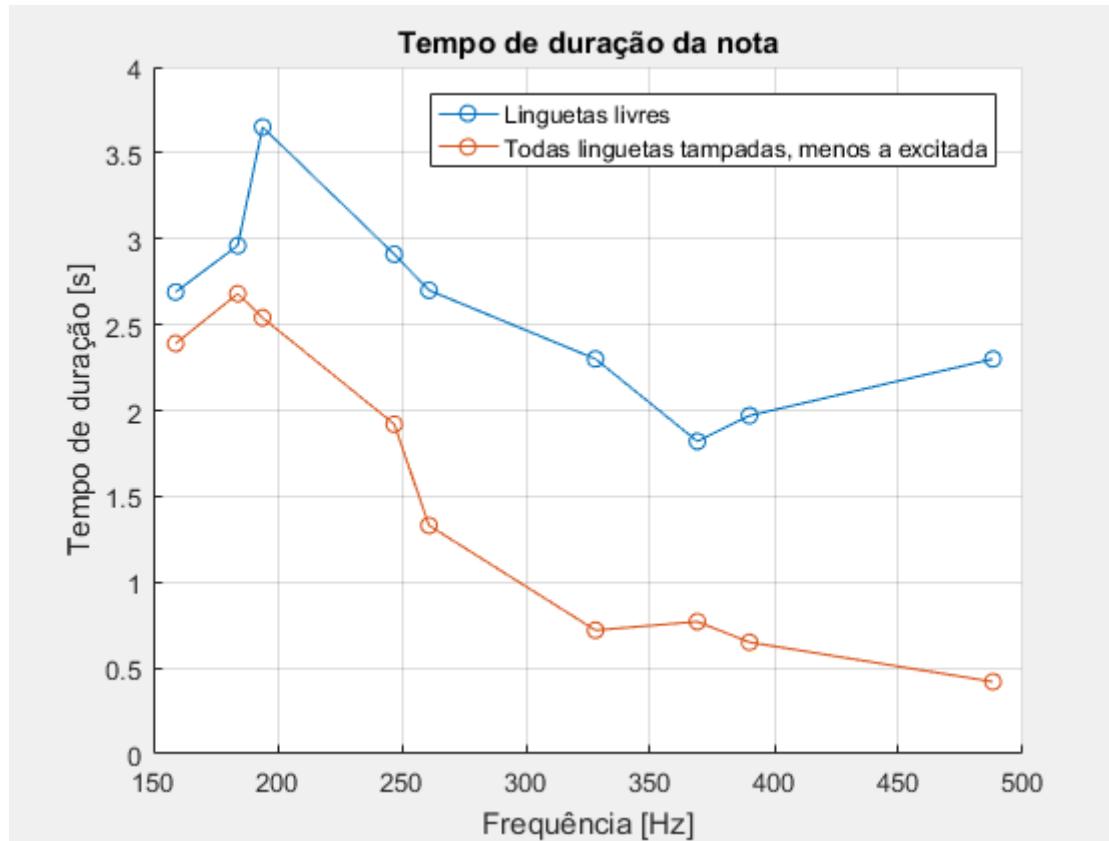


Figura 24 – Tempo de duração do som emitido por cada lingueta. Fonte: Autoral.

Como esperado, observa-se que ao colocar as fitas crepes, o tempo médio de duração das notas foi reduzido. A principal hipótese para esse fenômeno é que as fitas absorvem as vibrações das linguetas adjacentes, pois como observado nas simulações, alguns modos de vibração indicam o movimento de mais de uma lingueta simultaneamente. Dessa maneira, a fita crepe atua como um elemento dissipativo inserido no sistema.

Resultados e Discussões – Etapas A e B

Após a conclusão das duas frentes iniciais da pesquisa, foi possível comparar os resultados obtidos. As frequências principais associadas a cada lingueta obtidas por cada uma das frentes foram plotadas no mesmo gráfico, mostrado na figura 25.

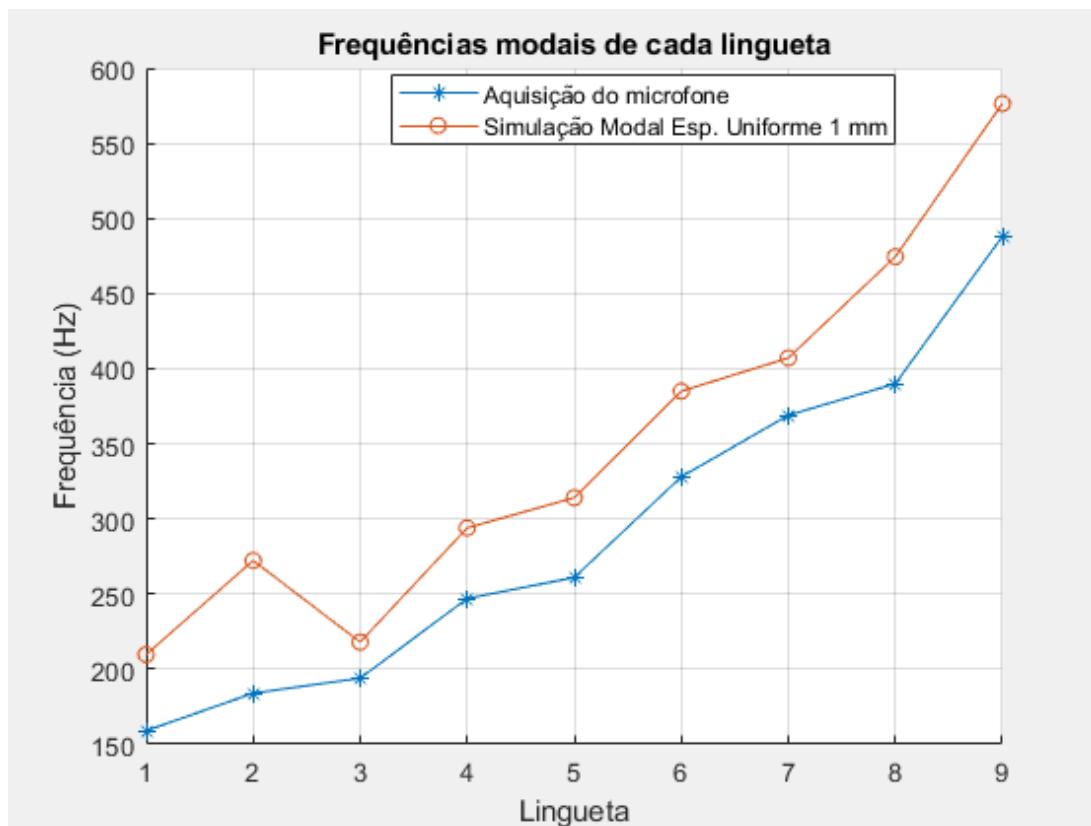


Figura 25 - Comparação dos resultados obtidos via experimento e simulação. Fonte: Autoral.

Observa-se uma clara correlação entre as curvas, com algumas ressalvas. A curva dos resultados da simulação modal está deslocada para frequências maiores, o que indica um possível erro na medida de espessura considerada. Além disso, a segunda lingueta apresentou um comportamento anormal em relação às outras, o que pode estar associado primariamente ao erro no desenho CAD dessa lingueta.

Apesar das divergências nos resultados, pode-se considerar que a etapa de avaliação qualitativa da hipótese proposta foi um sucesso. A segunda etapa da pesquisa foi direcionada para encontrar a fonte de tais erros e minimizá-los.

C - Refinamento da simulação modal

Como discutido, as hipóteses para as fontes de erro eram a geometria externa e a espessura da chapa. A solução proposta para reduzir os erros de medição manual foi realizar um escaneamento tridimensional do instrumento. Devido ao baixo custo, o processo escolhido para realizar a digitalização da geometria foi o escaneamento através de imagens, utilizando o software Autodesk ReCap.

Este programa, com licença para estudantes, cria malhas tridimensionais a partir de fotos do objeto tiradas de vários ângulos. Após algumas tentativas, foi observado que o programa é ineficaz para digitalizar objetos com geometria muito simétrica, e além disso não consegue processar imagens com reflexos. Para resolver o problema da simetria, foram colados “TAGs” com desenhos diferentes em cada parte do instrumento e da mesa a qual estava apoiado. Para resolver o problema do reflexo, sua superfície foi revestida com talco. Foram tiradas um total de 100 fotos em um estúdio com luminosidade controlada e fundo infinito branco. A posição da câmera em cada foto está representada na figura 26.

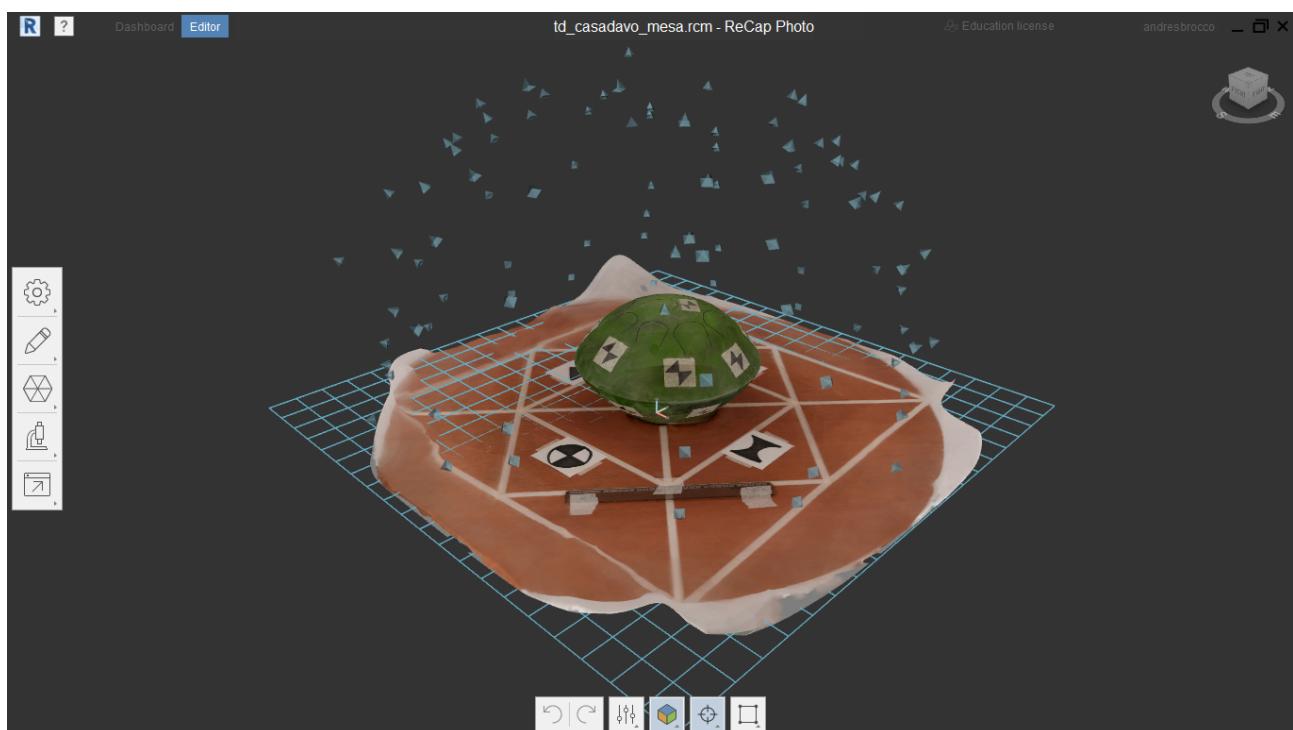


Figura 26 - Posicionamento da câmera em cada foto para o escaneamento. Fonte: Autoral.

Para aplicar a escala ao desenho, uma régua de 30cm foi fixada à mesa.

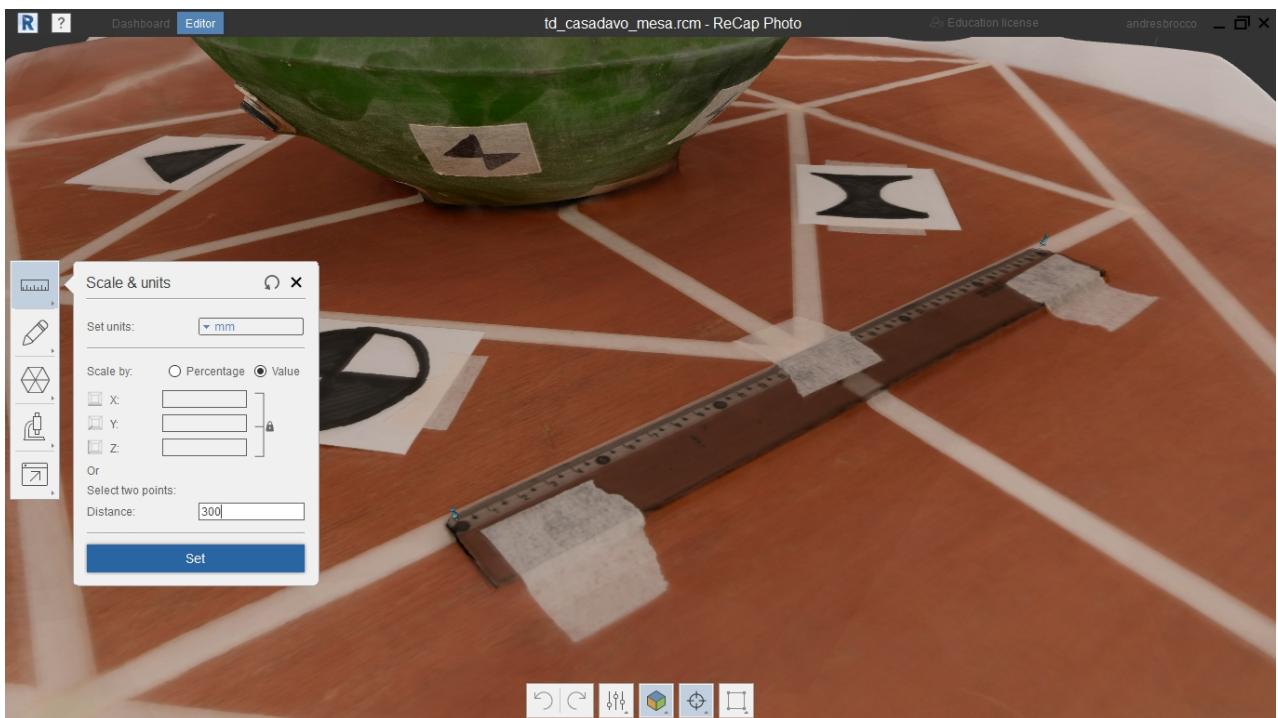


Figura 27 - Correção de escala para o escaneamento. Fonte: Autoral.

O resultado da malha pode ser observado na figura 28.

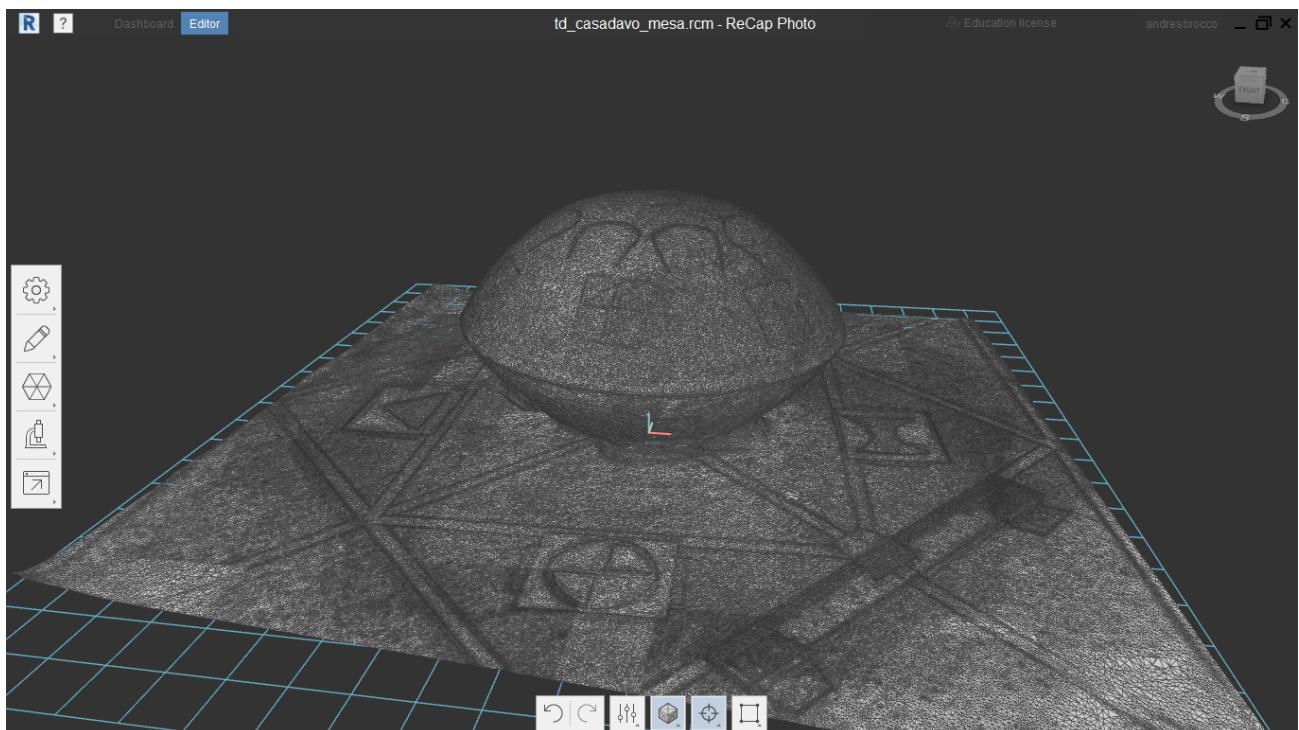


Figura 28 - Visualização da malha gerada. Fonte: Autoral.

Após recortar apenas a geometria de interesse, foi possível importá-la para o software Creo Parametric, e redesenhar o instrumento.

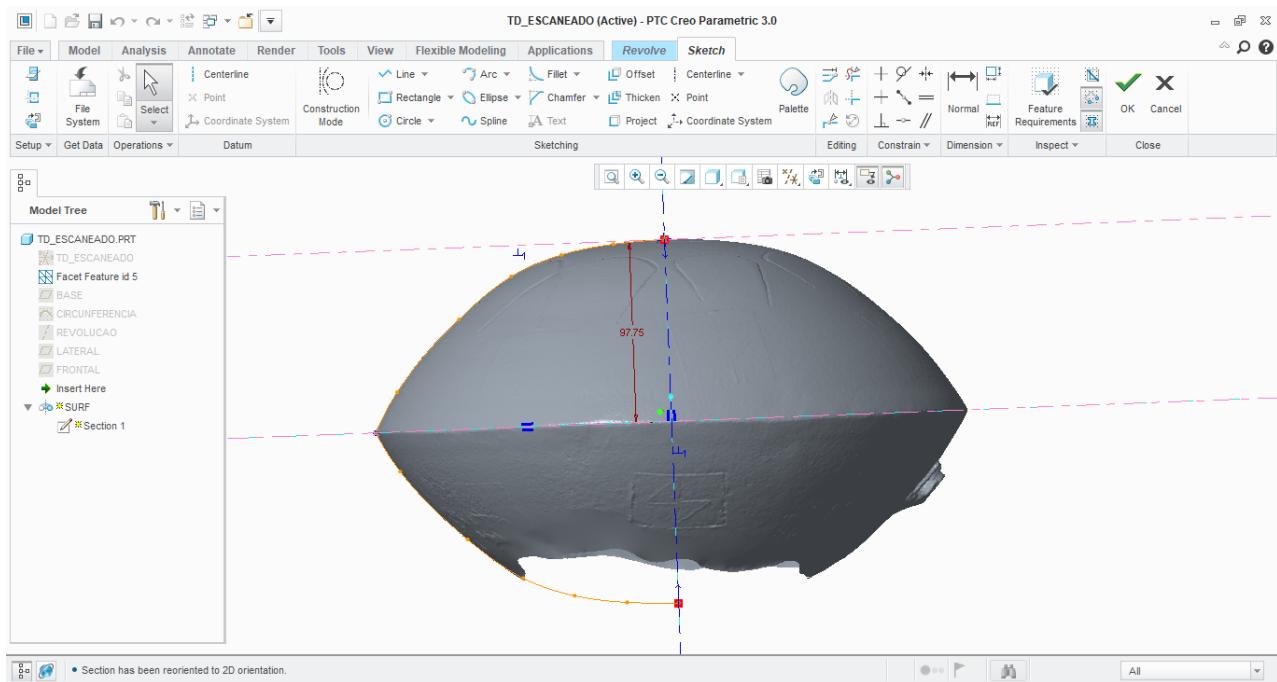


Figura 29 - Malha escaneada importada ao Creo Parametric. Fonte: Autoral.

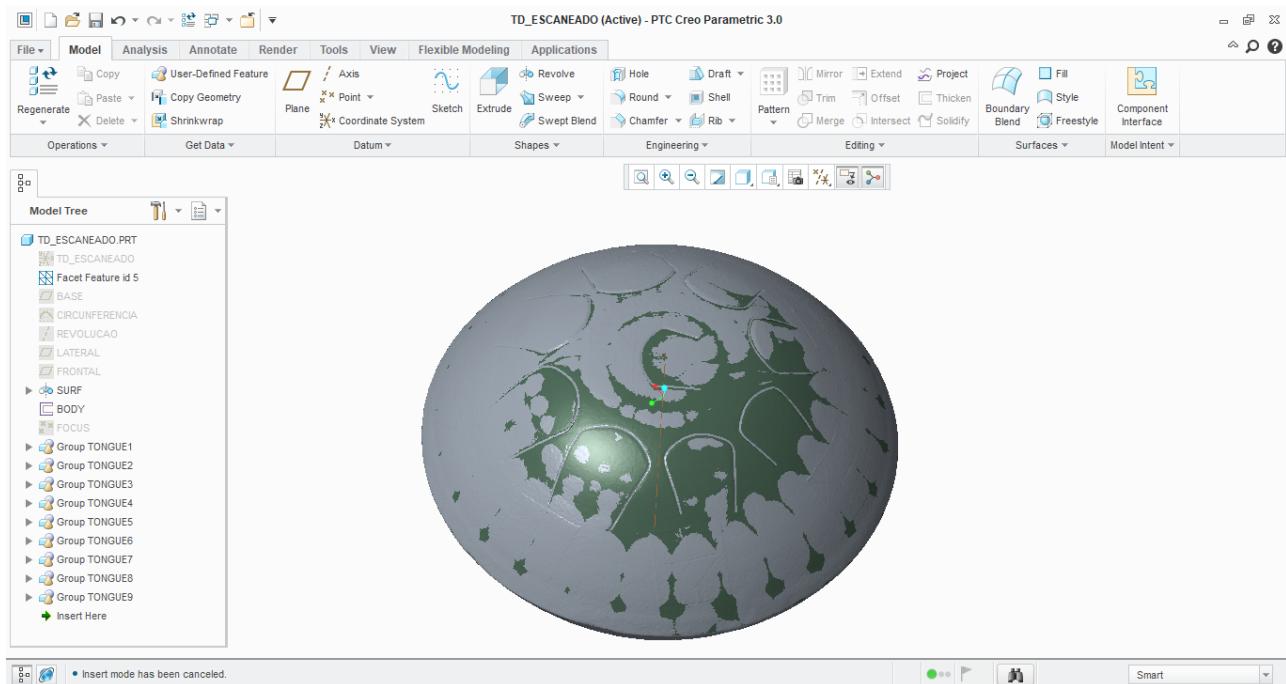


Figura 30 - CAD sobre a malha escaneada.

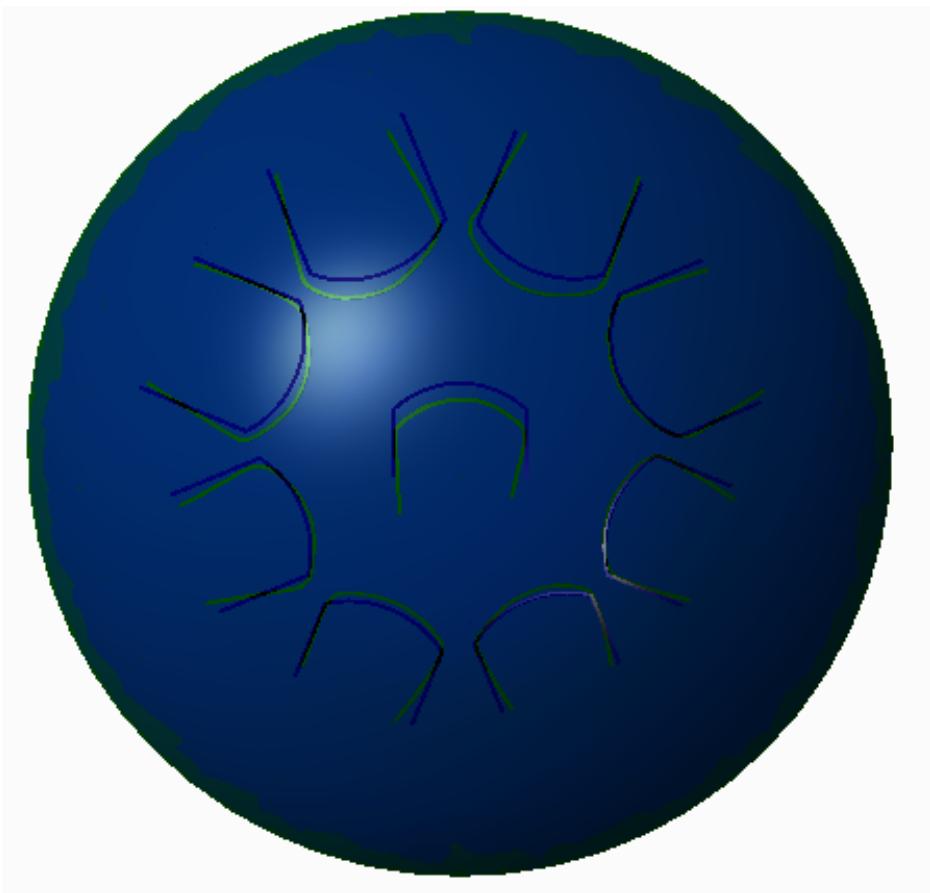


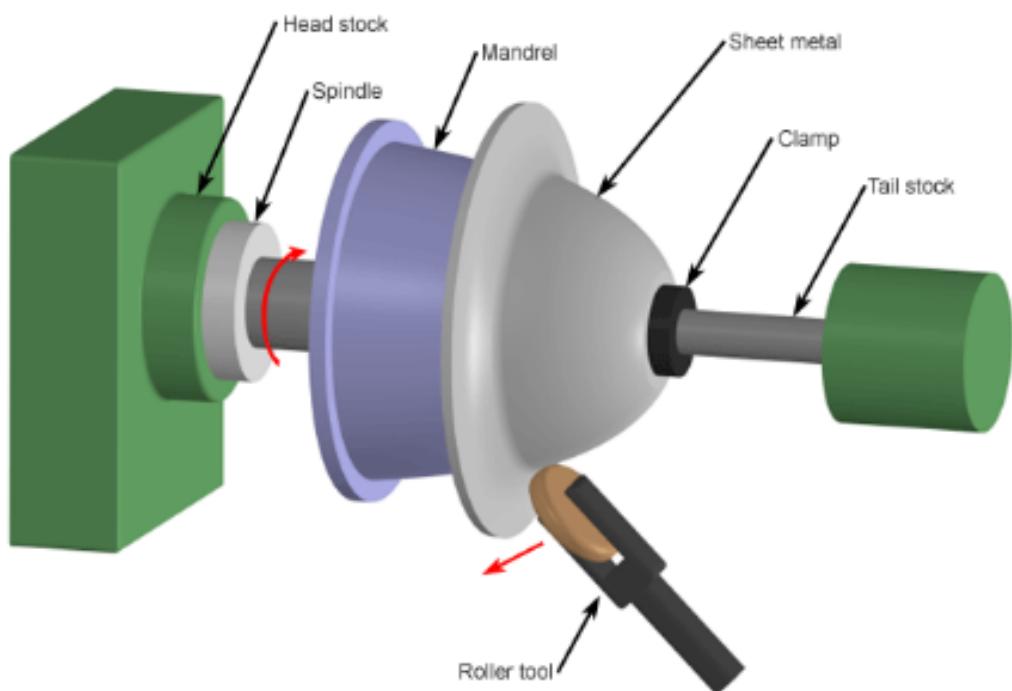
Figura 31 - Comparação da geometria feita a partir da malha escaneada com a geometria feita a partir de medições manuais.



Figura 32 - Renderização do CAD final. Fonte: Autoral.

Com o novo CAD, os erros associados às medidas externas foram praticamente mitigados. Para reduzir o erro relativo à espessura, o ideal seria fazer medições em diversos pontos da chapa, mas isso não foi possível pois o instrumento é totalmente fechado. Dessa forma, haviam duas alternativas: cortar o instrumento ao meio para realizar as medições, ou inferir a espessura de maneira teórica.

Após conversa com o fabricante, foi constatado que o processo de conformação da chapa utilizado foi o repuxo, representado na figura 33.



Copyright © 2009 CustomPartNet

Figura 33 - Processo de repuxo para conformação da chapa. Fonte: [7]

O processo de repuxo consiste em deformar a chapa plasticamente utilizando um rolo contra um molde. Dessa maneira a chapa com espessura t_0 sofre variação de espessura ao longo da direção axial proporcional ao seno do ângulo de deformação α , conforme a relação indicada na figura 34.

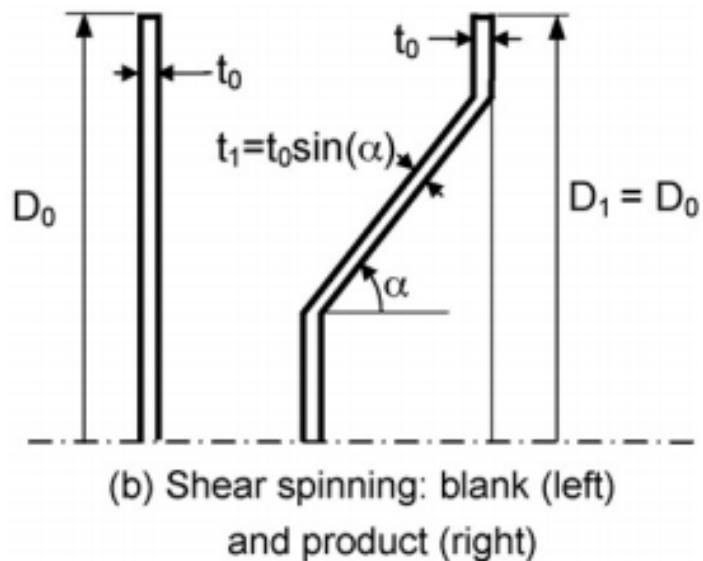


Figura 34 - Relação de variação de espessura durante processo de repuxo. Fonte: [8].

Portanto, para obter a curva de espessura estimada, deve-se encontrar os ângulos de deformação ao longo do eixo de simetria do instrumento, conforme representado no software Creo Parametric.

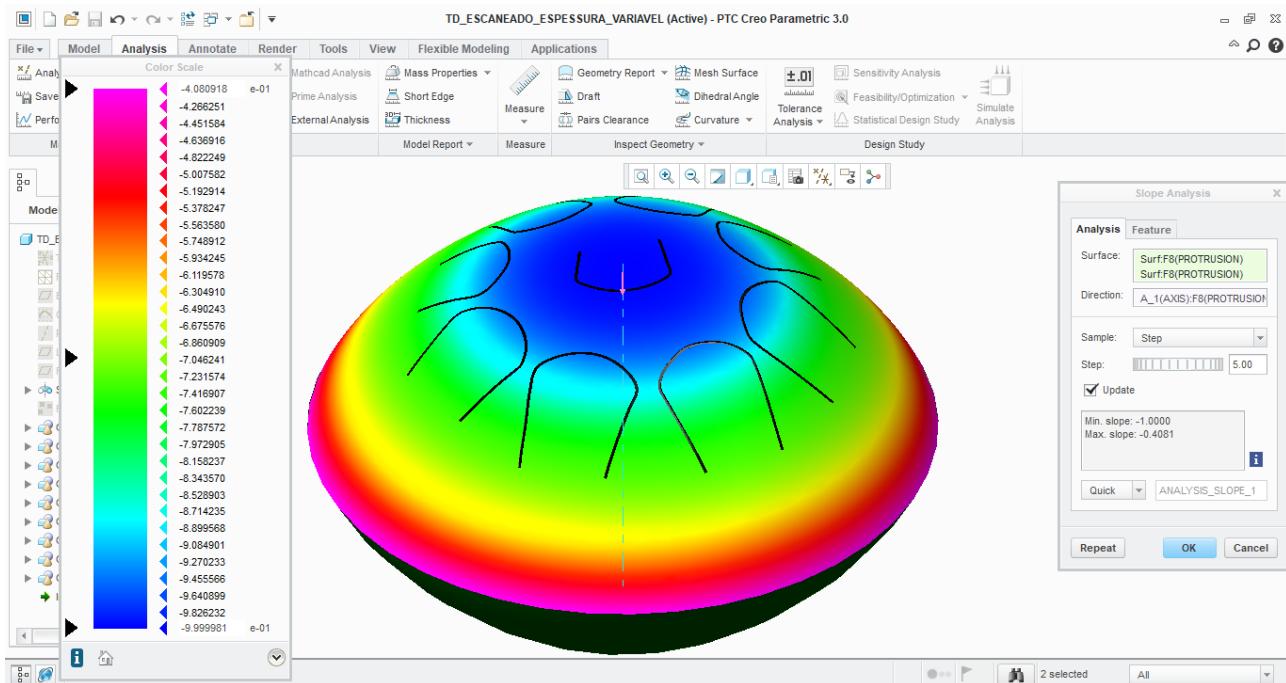


Figura 35 - Ângulos entre os vetores normais à superfície e o eixo de simetria do instrumento. Fonte: Autoral.

Com esses valores de α , e a espessura inicial da chapa informada pelo fabricante (1.37mm), foi possível traçar no MatLab a curva teórica de espessura em função da distância Y ao plano de simetria vertical do instrumento, conforme a figura 36.

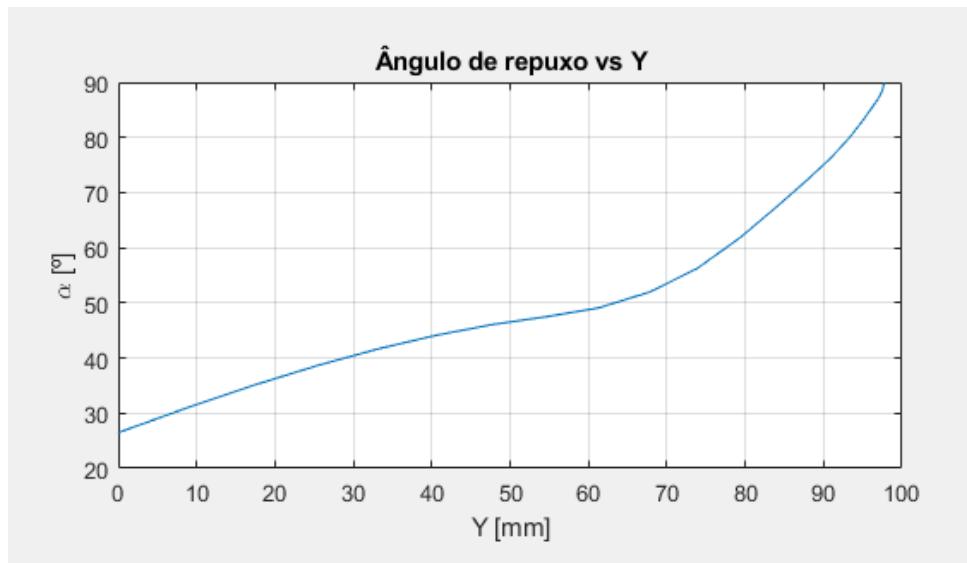


Figura 36 - Ângulo de repuxo em função da distância ao plano de simetria vertical. Fonte: Autoral.

O novo modelo CAD e a curva de espessura teórica foram então inseridos no software Ansys Workbench.

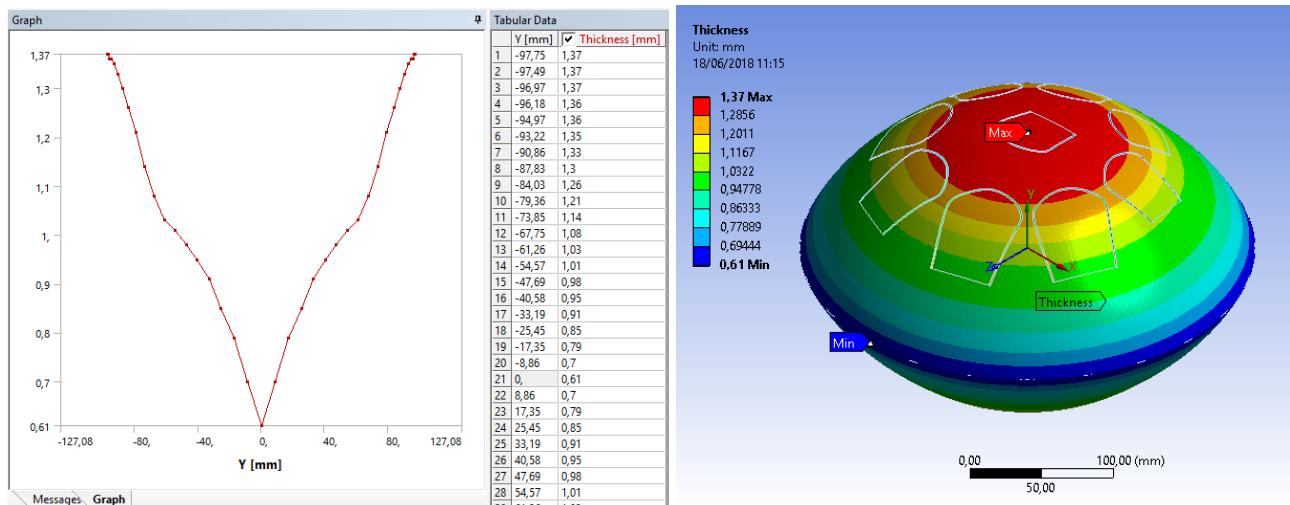
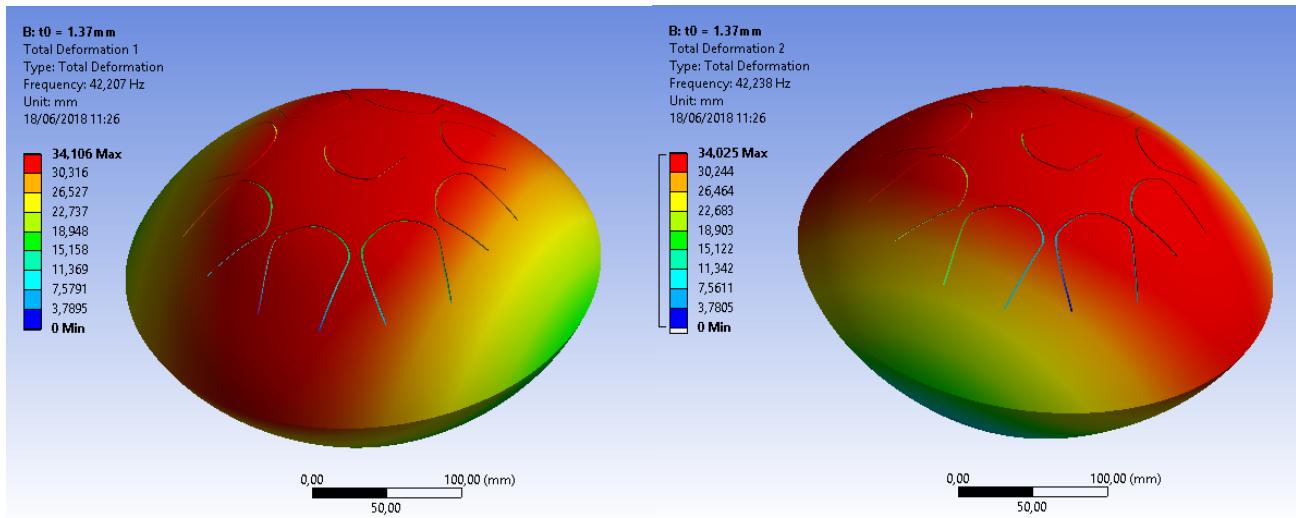
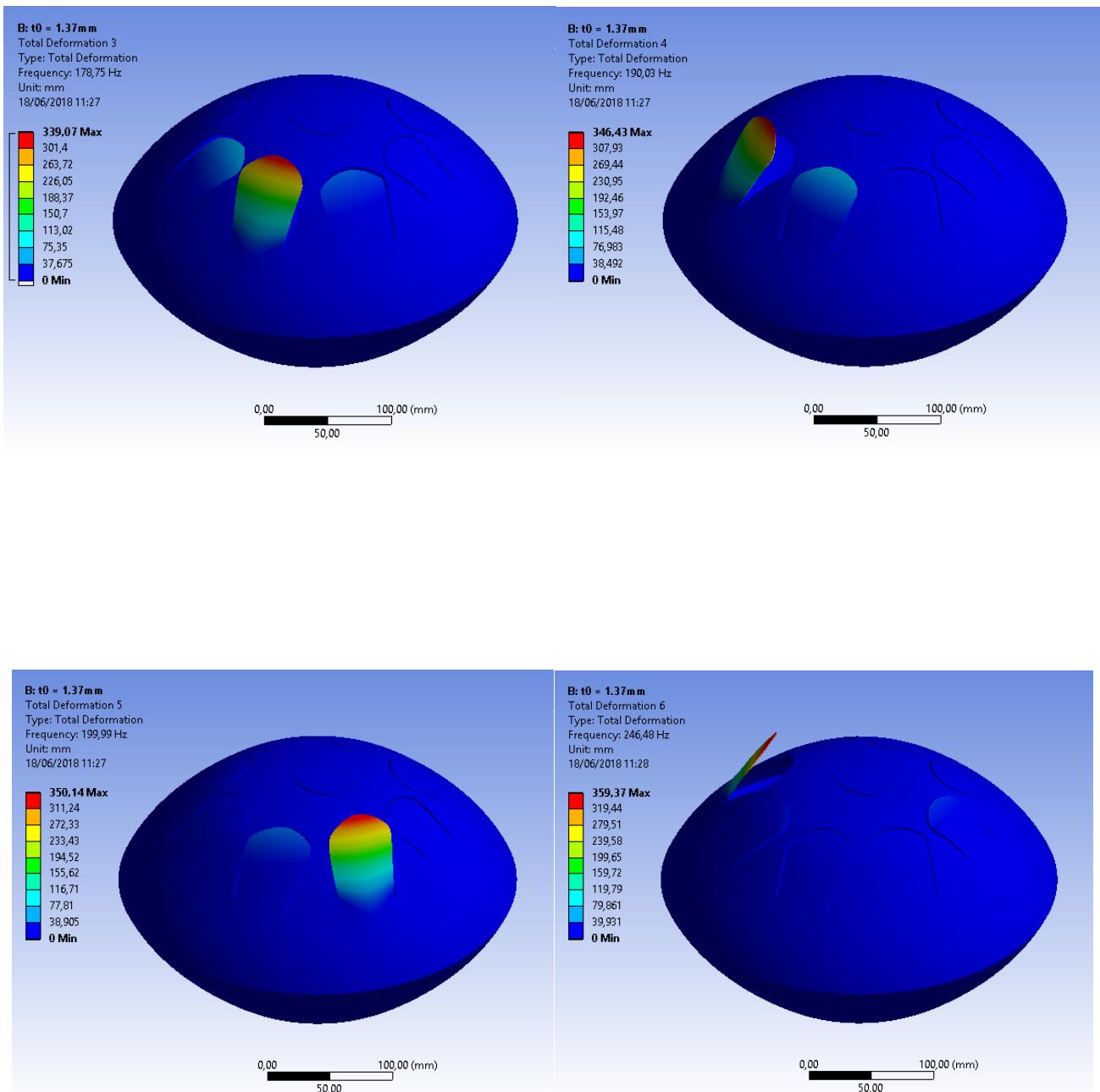
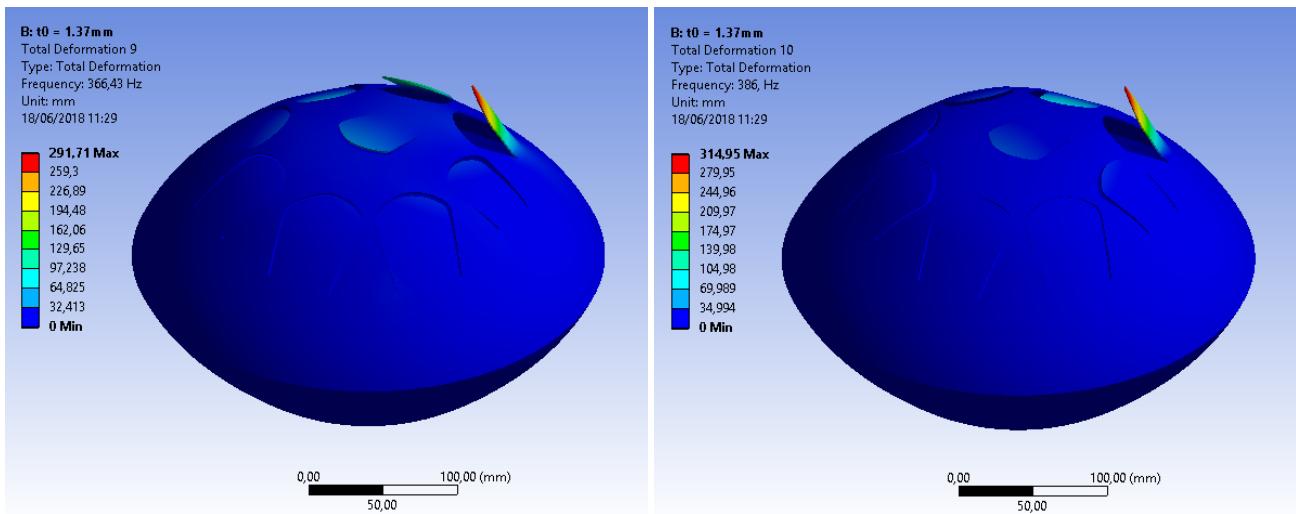
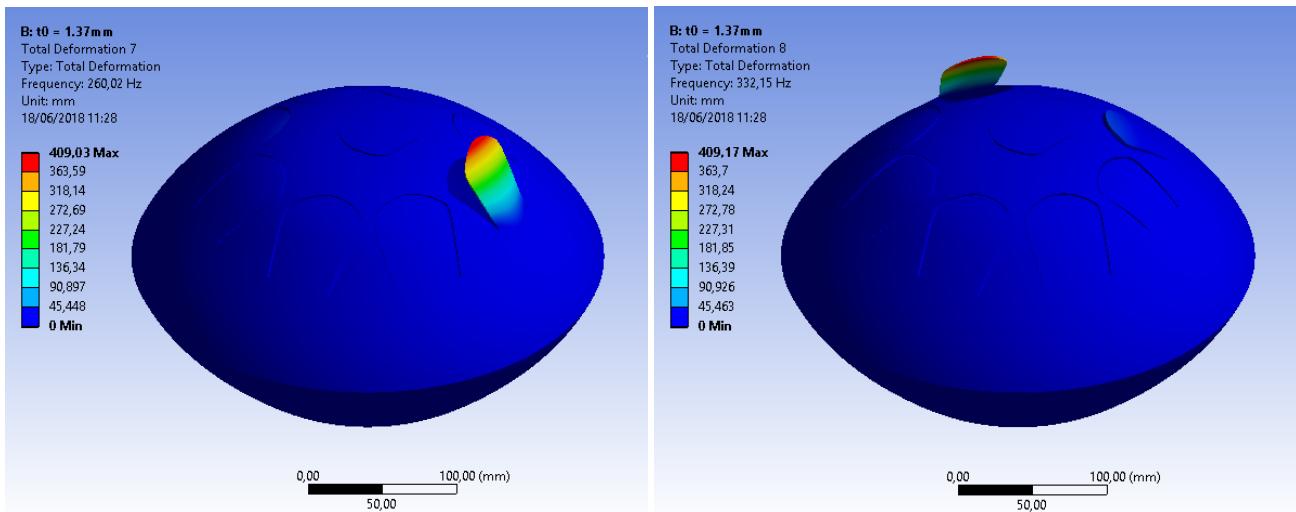
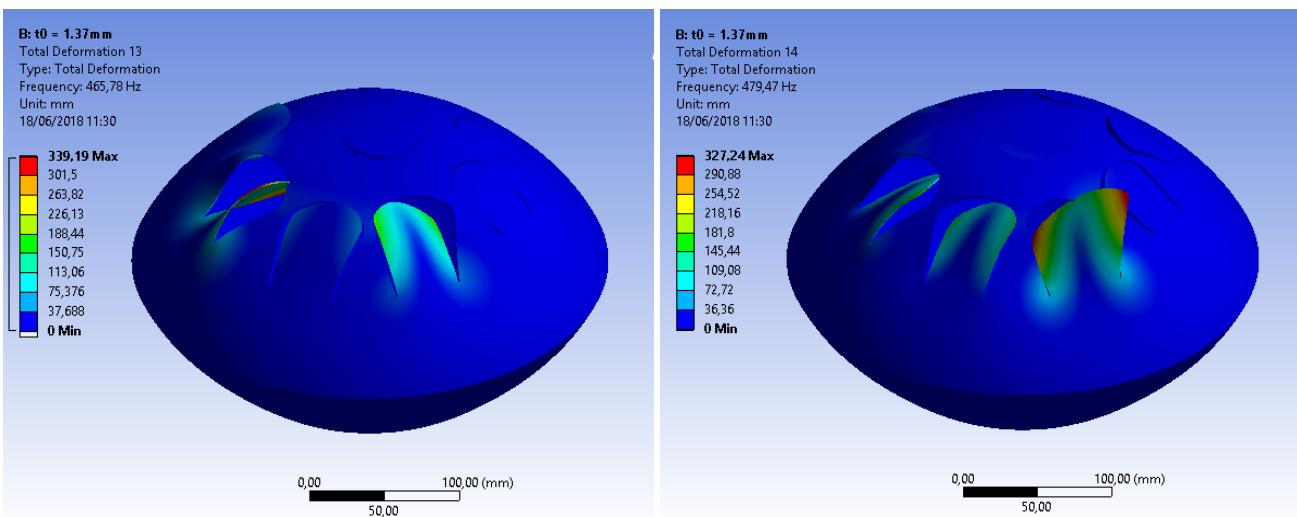
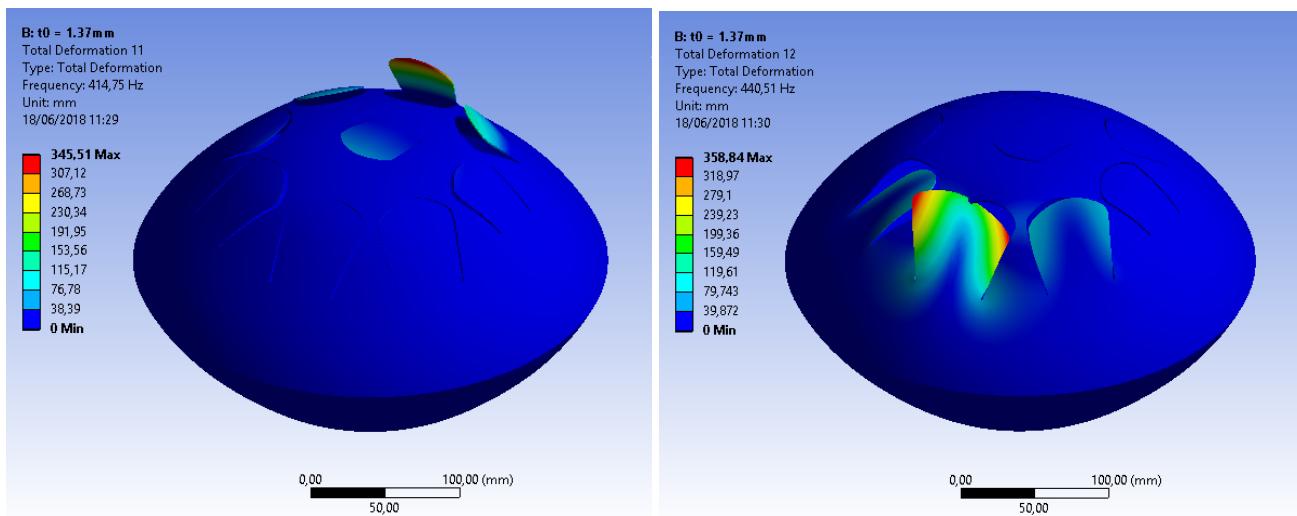


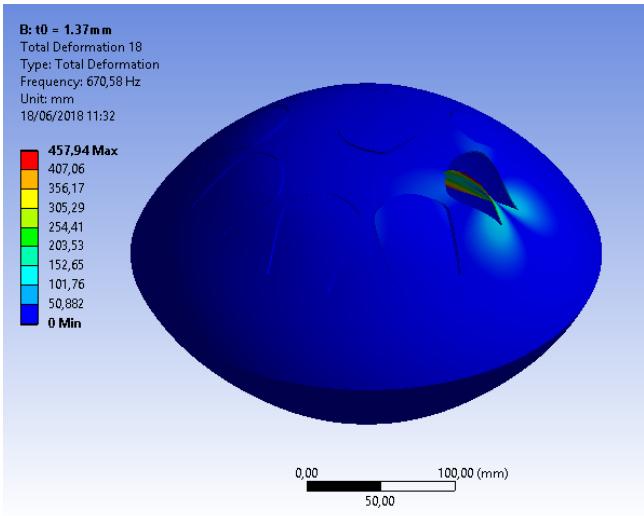
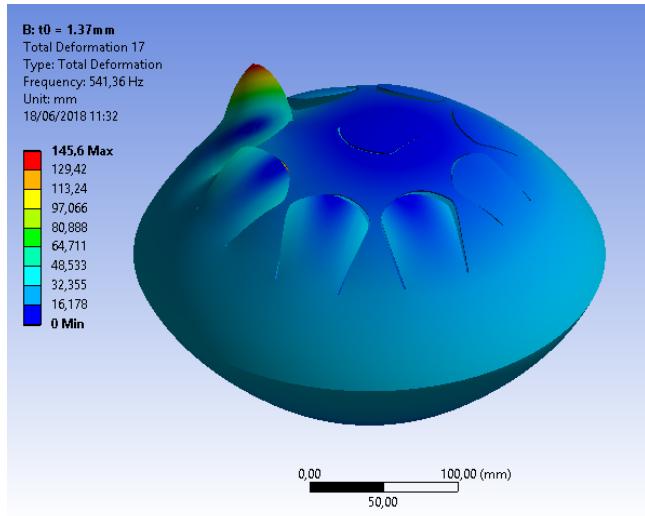
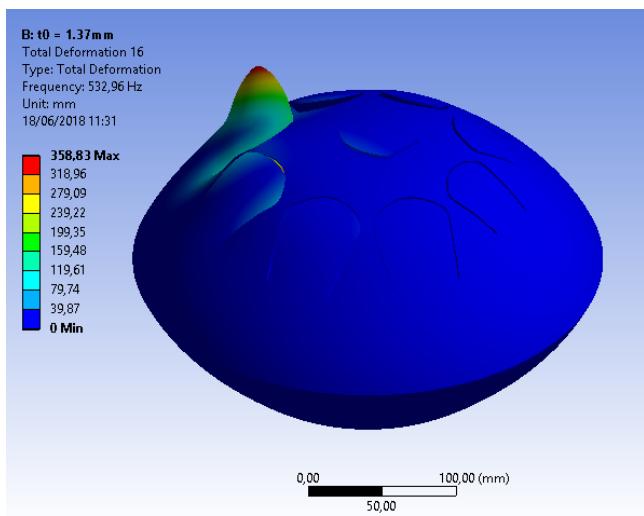
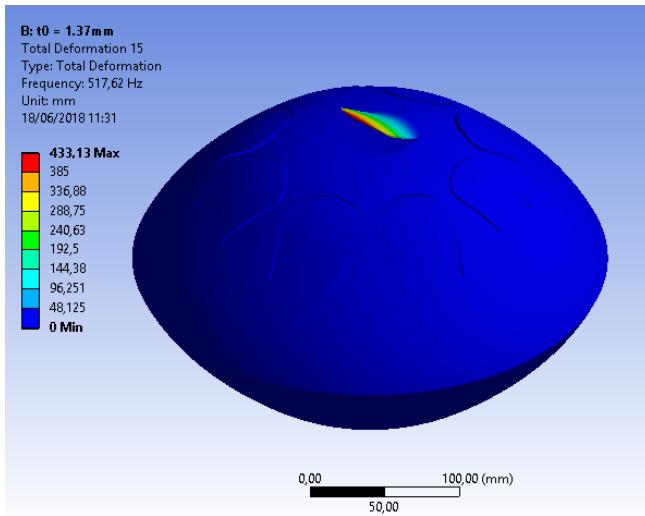
Figura 37 - Curva de espessura parametrizada no software para simulação modal. Fonte: Autoral.

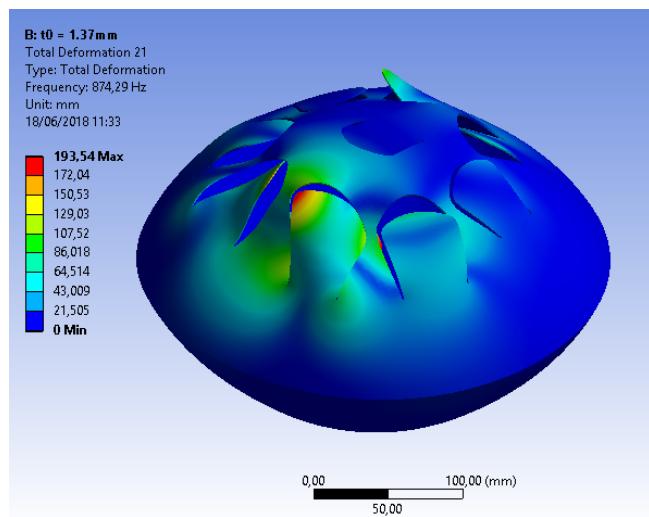
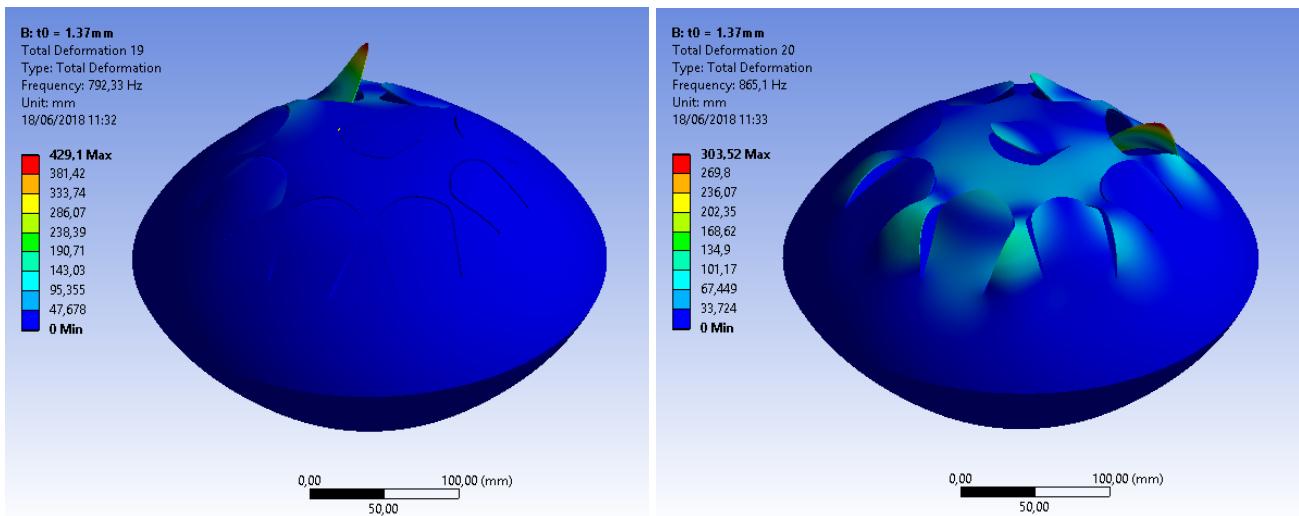












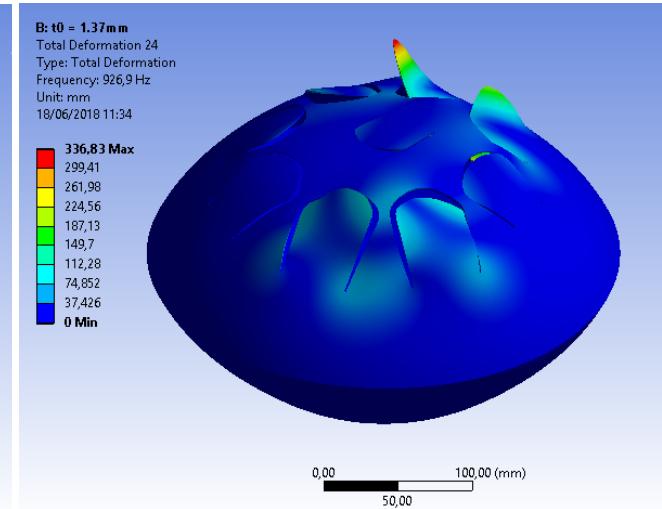
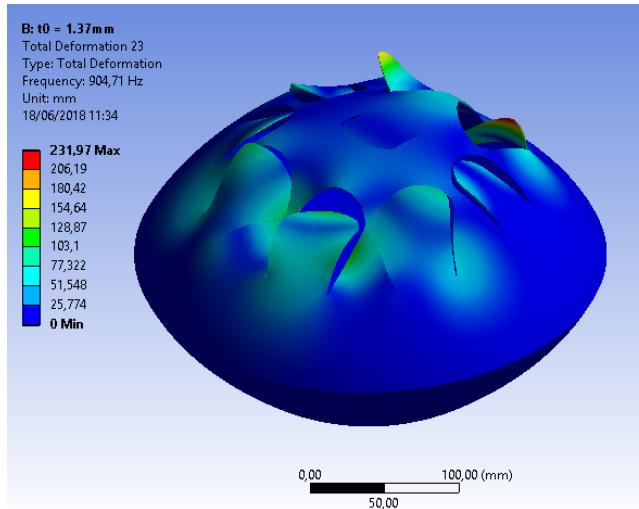
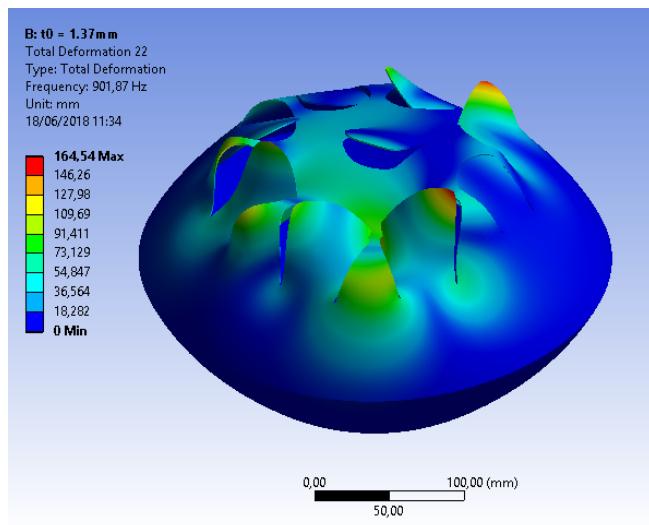


Figura 38 - Formas modais relativas às frequências até 950 Hz

Tabela 6 – Frequências naturais de cada modo. Fonte: Autoral.

Mode	Frequency [Hz]
1,	42,207
2,	42,238
3,	178,75
4,	190,03
5,	199,99
6,	246,48
7,	260,02
8,	332,15
9,	366,43
10,	386,
11,	414,75
12,	440,51
13,	465,78
14,	479,47
15,	517,62
16,	532,96
17,	541,36
18,	670,58
19,	792,33
20,	865,1
21,	874,29
22,	901,87
23,	904,71
24,	926,9
25,	974,67

Observa-se novamente que os dois primeiros modos estão associados à rotação em torno do ponto de apoio. Também é possível notar que alguns modos são relativos à torção das linguetas. É importante ressaltar que estes modos não são excitados ao tocar o instrumento, pois o impacto da baqueta em cada lingueta representa uma condição inicial de velocidade linear, e não rotacional, o que resultará apenas na flexão da lingueta, e não na sua torção.

As frequências naturais associadas às deformações de cada lingueta são summarizadas na tabela 7 a seguir.

Tabela 7 - Frequências naturais associadas a cada lingueta. Fonte: Autoral.

Lingueta	Frequências (Hz)
1	178,8
2	190,0
3	200,0
4	246,5
5	260,0
6	332,2
7	366,4
8	386,0
9	517,6

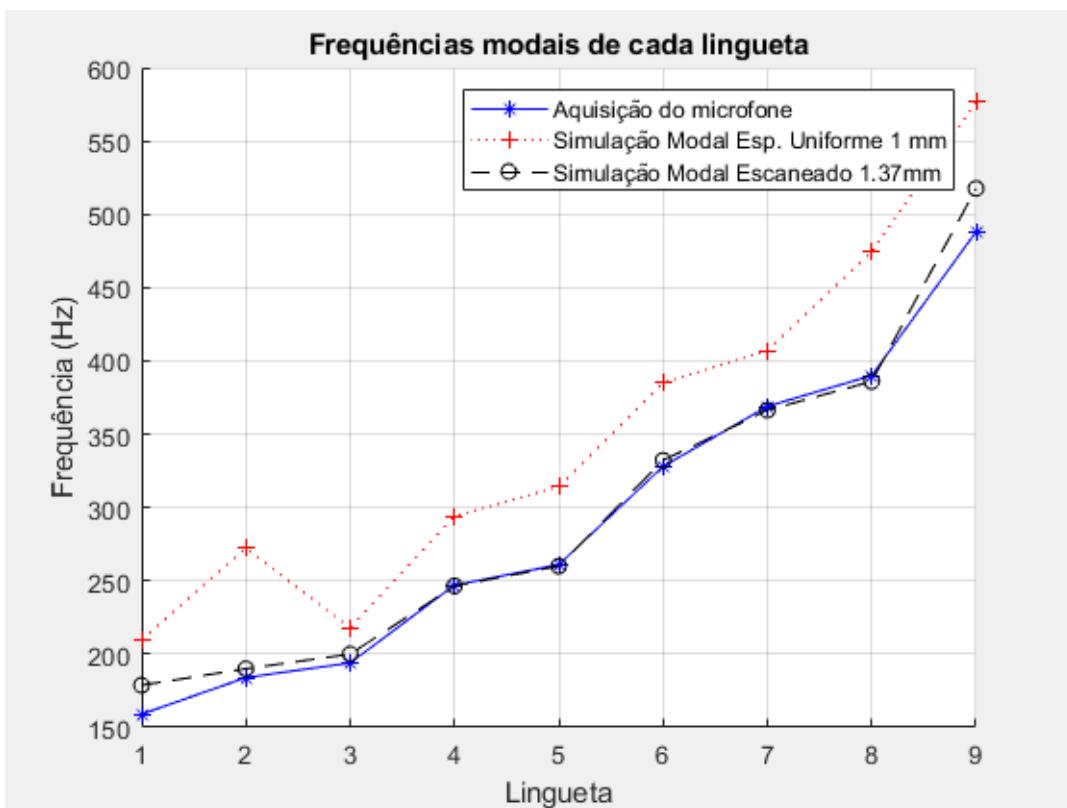


Figura 39 - Comparaçao entre as simulações modais e a aquisição do microfone. Fonte: Autoral.

Observa-se que o resultado da simulação modal se aproximou muito das frequências obtidas pelo microfone, exceto as linguetas 1 e 9. Essa divergência pode ser atribuída à irregularidades no processo de repuxo da chapa, onde a espessura pode ficar maior ou menor do que o esperado.

D – Ensaio Acústico em Câmara Anecoica

Para refinar a aquisição experimental sobre o comportamento acústico do instrumento, foi realizado um ensaio de excitação harmônica na base do instrumento, dentro da câmara anecoica do laboratório do Departamento de Mecânica Computacional (DMC) da faculdade. O instrumento foi suspenso por um suporte de tecido ilustrado na figura 40.

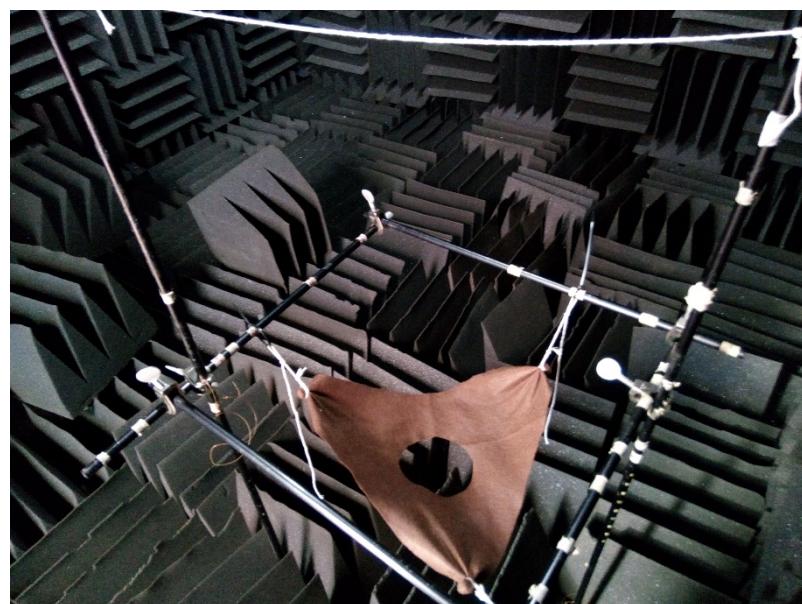


Figura 40 - Suporte para apoio do instrumento. Fonte: Autoral.

O shaker modelo K2004E01 foi posicionado sobre o instrumento, e em sua extremidade foi colocado a célula de carga modelo PCB 208A02 com cera em sua extremidade para aderi-la à base do instrumento.

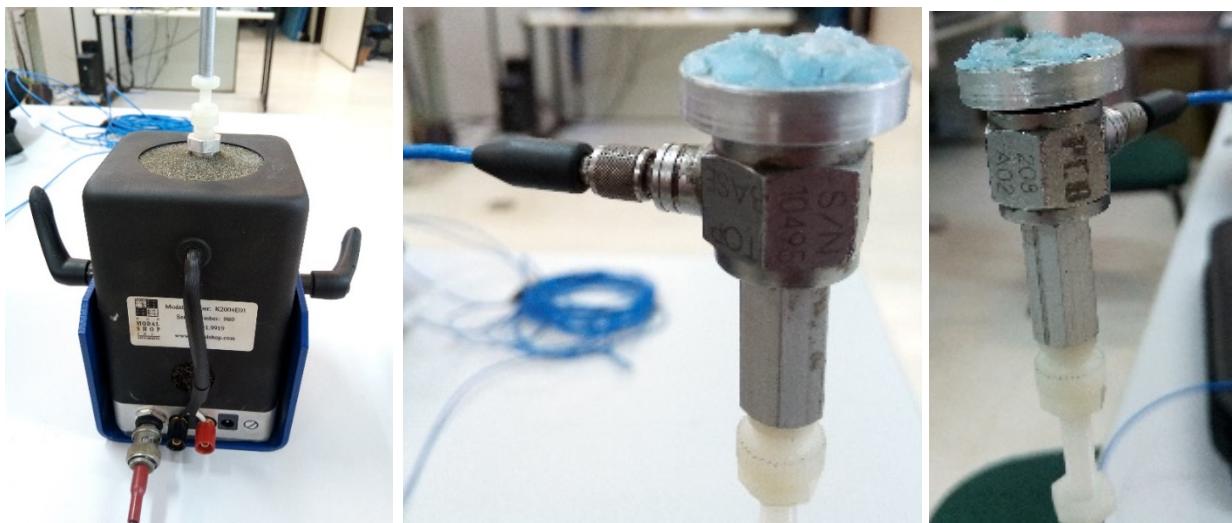


Figura 41 - Shaker e célula de carga utilizados no ensaio. Fonte: Autoral.



Figura 42 - Posição do Shaker no ensaio. Fonte: Autoral.

Foi utilizado o microfone GRAS 40AE ½" Prepoloized Free-Field com preamplificador GRAS 26CA ½", posicionado 50cm acima do instrumento e direcionado ao instrumento. O setup completo pode ser visto na figura 43.



Figura 43 - Preamplificador e microfone utilizados no ensaio. Fonte: Autoral.

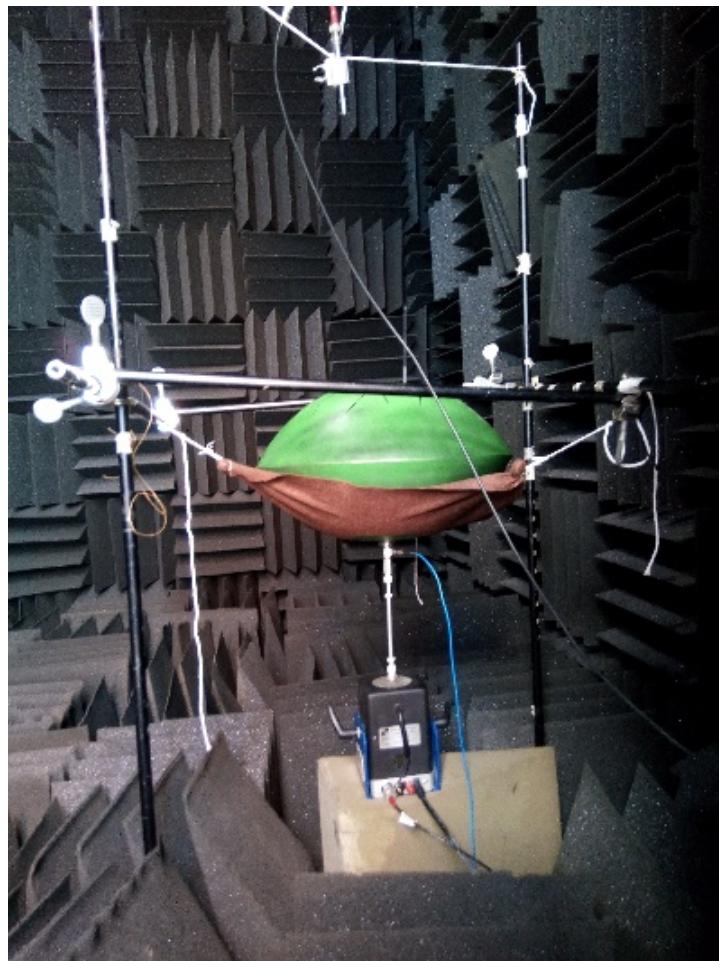


Figura 44 - Setup do ensaio. Fonte: Autoral.

Foi utilizada a interface LMS em conjunto com o software Siemens LMS TestLab MIMO Sweep & Stepped Sine Testing. O shaker foi conectado à porta de saída da interface, enquanto os sensores de força e microfone foram conectados às portas de entradas, conforme a figura 45.



Figura 45 - Interface LMS utilizada para realização do experimento. Fonte: Autoral.

O teste realizado foi uma varredura de senos de 100Hz a 1000Hz, a uma taxa de incremento linear de 0.25Hz/sec, como mostrado na imagem 46. A amplitude da oscilação foi ajustada à máximo possível tal que a cera não descolasse do instrumento. Após esse processo iterativo, a sensibilidade do microfone foi ajustada.

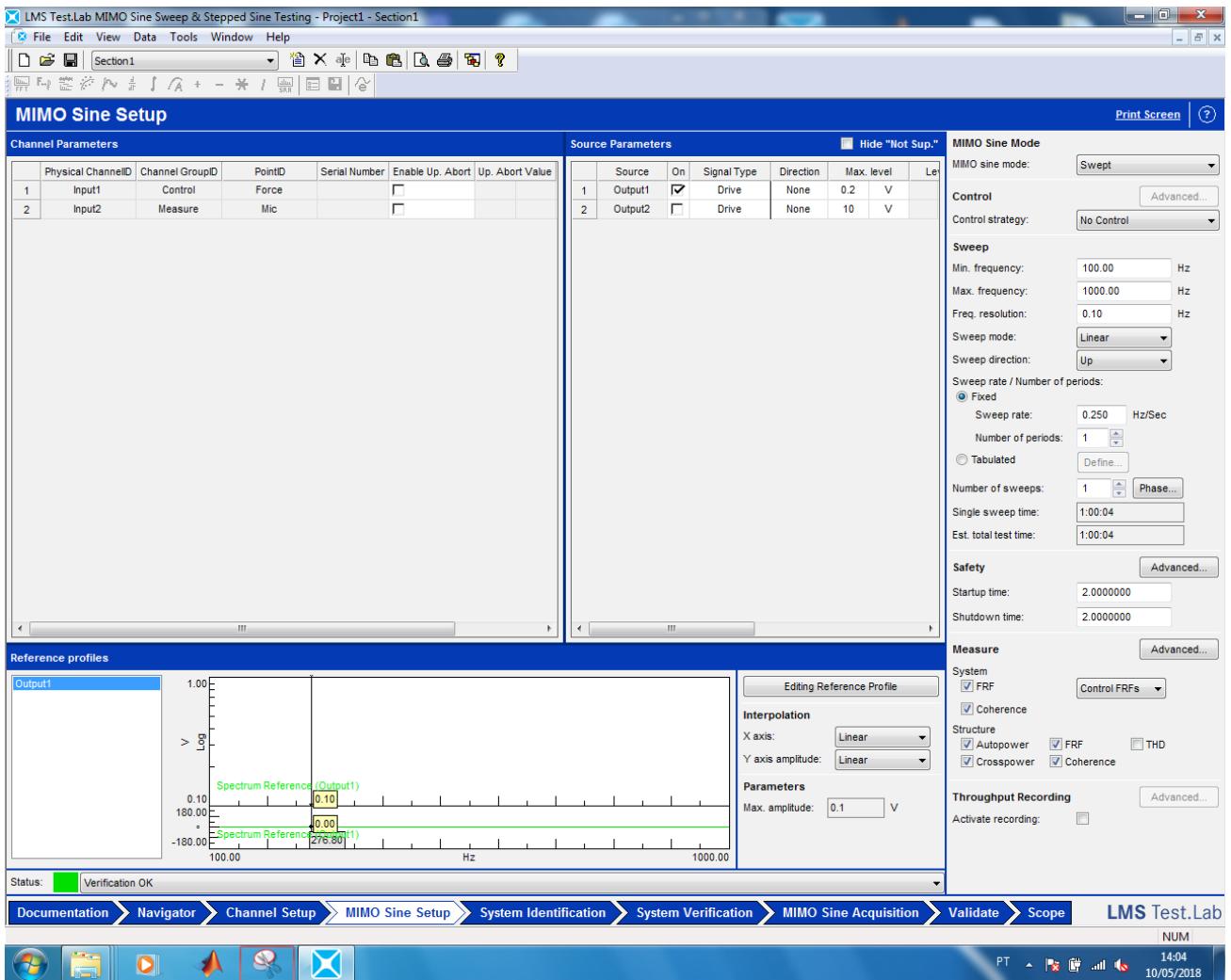


Figura 46 - Setup para varredura de senos. Fonte: Autoral.

A realização do experimento durou 1 hora. Os dados coletados foram os sinais temporais do Microfone, Sensor de força e a FRF Mic/Force. Após importar ao software MatLab, podemos visualizar os resultados.

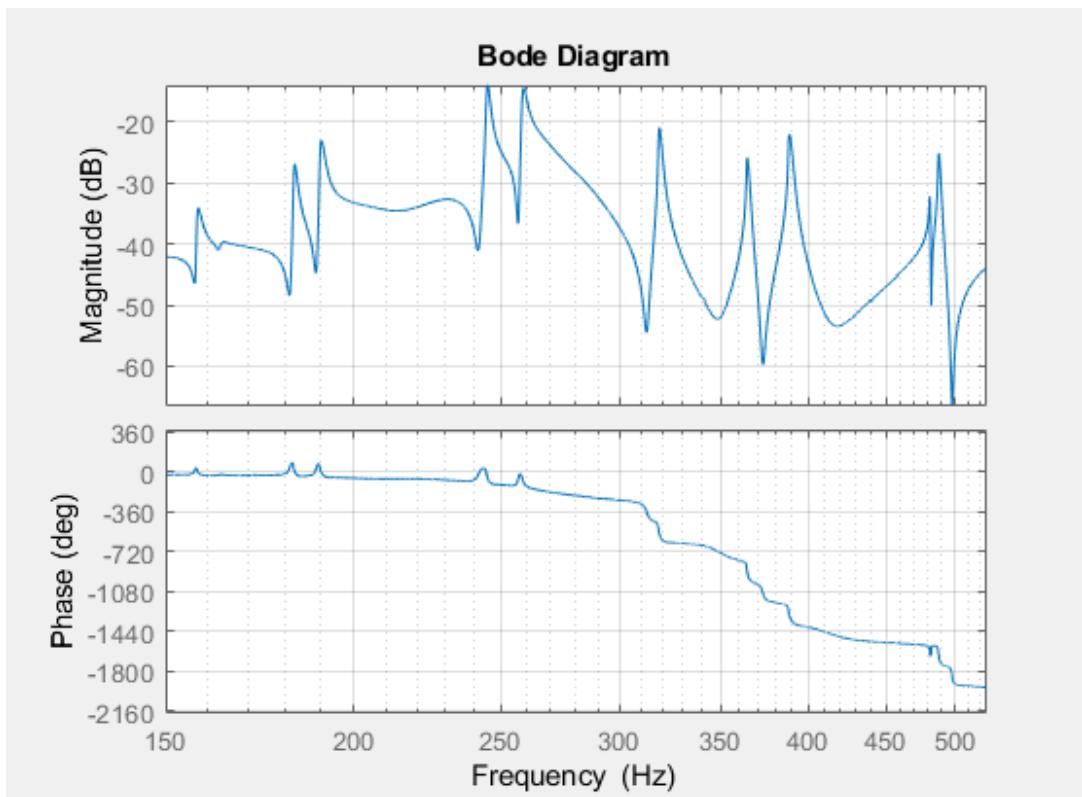


Figura 47 - Diagrama de Bode da FRF Mic/Force na região de interesse 150Hz a 525 Hz. Fonte: Autoral.

Ao analisar o gráfico de Bode da FRF Mic/Force, observa-se alguns picos de amplitude, associados às frequências naturais amortecidas. Para encontrar as frequências naturais, deve-se encontrar o ponto cuja resposta apresenta apenas componente ativa, e nenhuma componente reativa. Esses pontos estão localizados sobre o eixo imaginário do diagrama de Nyquist.

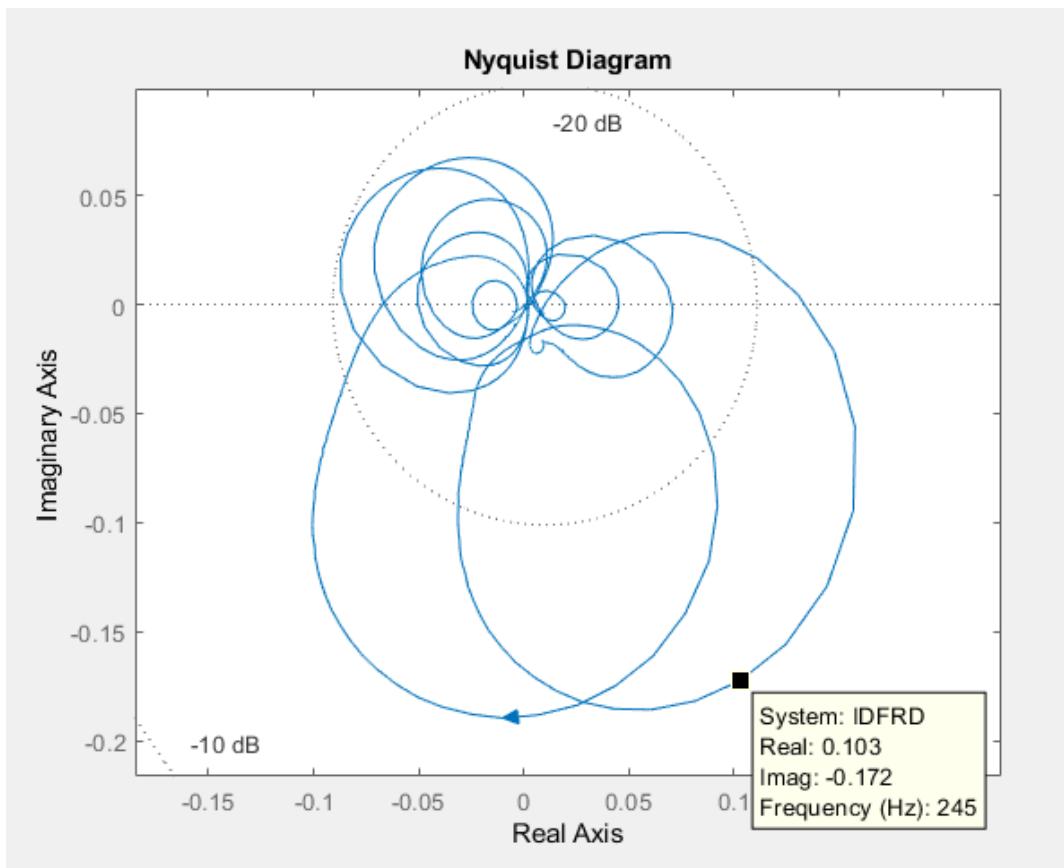


Figura 48 - Diagrama de Nyquist da FRF Mic/Force. Fonte: Autoral.

Como ilustrado na figura 48, a frequência de maior amplitude possui componente real, indicando a presença de amortecimento no sistema. A tabela 8 sumariza as frequências naturais e amortecidas encontradas a partir do diagrama de nyquist.

Tabela 8 - Frequências encontradas no diagrama de Nyquist. Fonte: Autoral.

Frequência [Hz]	
wd	wn
158,5	161,4
182,9	188,2
190,9	201,1
245,6	246,2
259,6	259,4
319,3	323,0
364,9	367,4
389,0	390,7
488,6	492,6
800,2	800,2
812,0	812,0
861,0	861,0

Resultados e Discussões – Etapas C e D

As etapas C e D tiveram como objetivo refinar os resultados obtidos nas etapas A e B. A tabela 9 compara as frequências obtidos através de cada método utilizado.

Tabela 9 – Tabela comparativa dos resultados obtidos experimentalmente e através da simulação modal.

Fonte: Autoral.

Lingueta	Frequência [Hz]			
	Microfone Celular	Simulação	Camara Anecoica	
			wd	wn
1	159	178,8	158,5	161,4
2	184	190,0	182,9	188,2
3	194	200,0	190,9	201,1
4	247	246,5	245,6	246,2
5	261	260,0	259,6	259,4
6	328	332,2	319,3	323,0
7	369	366,4	364,9	367,4
8	390	386,0	389,0	390,7
9	488	517,6	488,6	492,6

Primeiramente, nota-se um alto grau de semelhança entre os valores obtidos com o microfone de celular e as frequências encontradas com microfone profissional em câmara anecoica. Também observa-se que as frequências das linguetas 2 e 3 encontradas através da simulação modal se aproximam das frequências naturais encontradas na FRF, o que faz sentido, já que a simulação numérica utilizada não considera amortecimento.

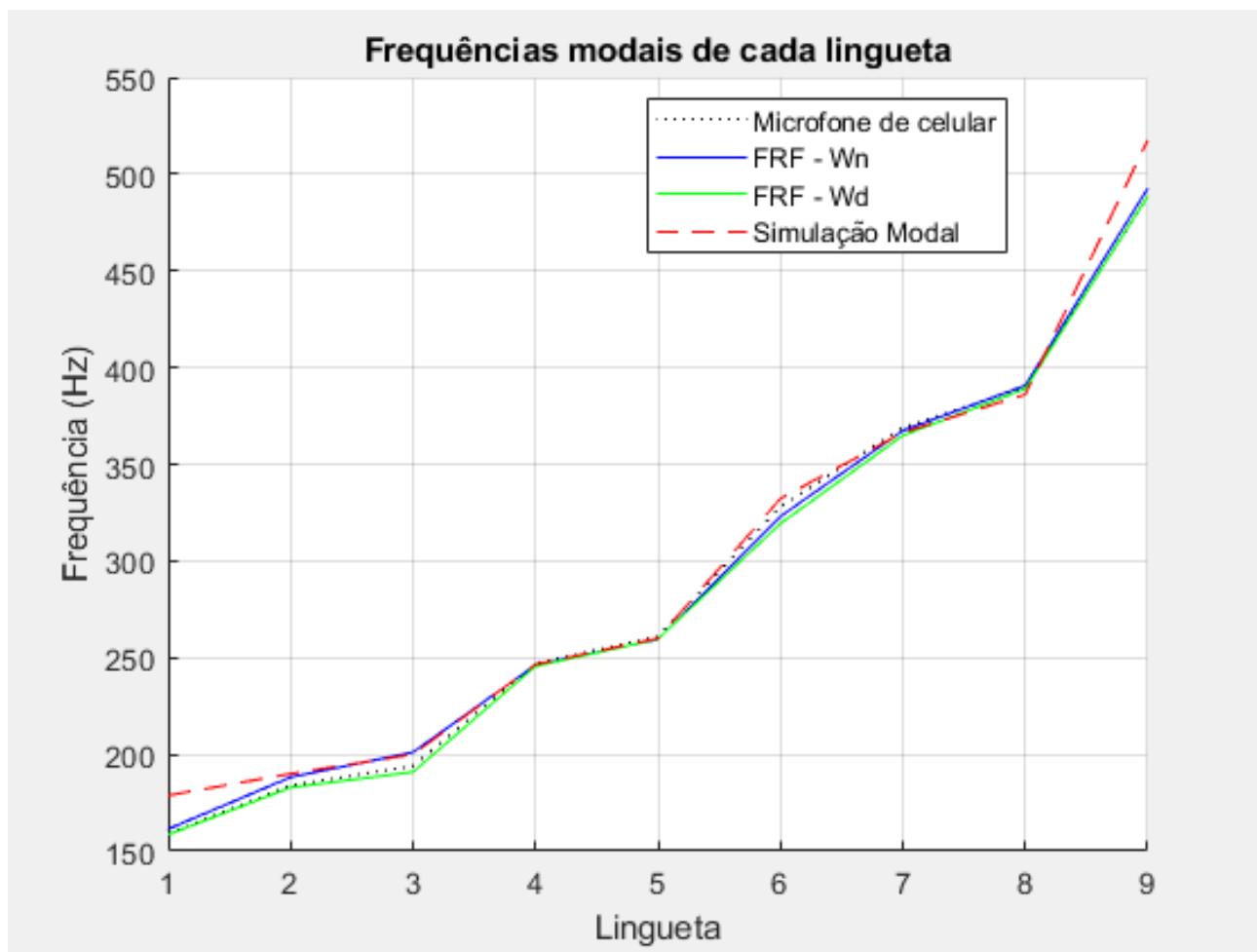


Figura 49 – Gráfico comparativo dos resultados obtidos experimentalmente e através da simulação modal.

Fonte: Autoral.

7. Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo estudar a correlação entre o comportamento vibratório e o comportamento acústico de um Steel Tongue Drum. A hipótese proposta foi que a frequência principal observada no espectro acústico ao “tocar” cada lingueta seria a frequência natural respectiva ao seu modo de vibração. Ou seja, essa hipótese desconsidera qualquer interação com fluido em que está imerso, no caso, ar.

Para testar a validade dessa hipótese, foram feitos experimentos acústicos em laboratório e simulações modais numéricas. A comparação dos resultados corroboram a hipótese proposta: seis das nove linguetas apresentaram frequências da simulação modal muito próximas da frequência obtida experimentalmente. As outras três sofreram leve desvio.

A continuação deste trabalho de conclusão focará em estudar as causas para o erro observado nessas três linguetas: para isso, a curva de espessura deve ser obtida experimentalmente. O ideal seria utilizar métodos não destrutíveis para medição de espessura, tal como o ultrassom, mas devido à dificuldade de acesso a esse equipamento, outras alternativas devem ser propostas. A alternativa mais viável é manufaturar outro instrumento, para que se possa realizar os ensaios acústicos e depois cortar o instrumento para medir seu perfil de espessura utilizando micrômetro.

8. Referências Bibliográficas

- [1] Rossing, T. D.; Morrison, A.; Hansen, U; Rohner, F; Schärer, S., **Acoustics Of The Hang: A hand-played steel instrument**, Stanford University, ISMA (2007).
- [2] Rossing, T.D., Hansen, U.J., Rohner, F., and Schärer. S. (2000) **Modal analysis of a new steel instrument: The ping** (139th ASA meeting, June 2000).
- [3] Rossing, T.D., Hansen, U.J., (2004) **Vibrational mode shapes in Caribbean steelpans: Part ii: cello and bass.** Applied Acoustics, 65(12):1233-1247.
- [4] Fletcher, N.H., Rossing, T.D., (1998) **The Physics of Musical Instruments** Springer 1998.
- [5] Hadi T. Nia, Ankita D. Jain, Yuming Liu, Mohammad-Reza Alam, Roman Barnas, Nicholas C. Makris, **The evolution of air resonance power efficiency in the violin and its ancestors**, Proc. R. Soc. A 2015 471 20140905; DOI: 10.1098/rspa.2014.0905. Published 11 February 2015
- [6] Harris, F. J., **On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform**, Proceedings of the IEEE, vol. 66, pp. 51-83, Jan 1978.
- [7] <http://www.custompartnet.com/wu/sheet-metal-forming>. (Visitado em 14/06/2018)
- [8] Wang, L., Long, H., **A study of effects of roller path profiles on tool forces and part wall thickness variation in conventional metal spinning**, Journal of Materials Processing Technology (2011).
- [9] Inman D.J., **Engineering Vibration**, (1994) Englewood Cliffs: Prentice Hall.