

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

VITÓRIA RIBEIRO CANUTO

**CORRELAÇÃO ENTRE FORÇA (N) E FREQUÊNCIA (Hz) EM CORDAS DE AÇO
INOXIDÁVEL UTILIZADAS EM VIOLÃO**

BELO HORIZONTE

2023

VITÓRIA RIBEIRO CANUTO

**CORRELAÇÃO ENTRE FORÇA (N) E FREQUÊNCIA (Hz) EM CORDAS DE AÇO
INOXIDÁVEL UTILIZADAS EM VIOLÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Carlos Eduardo dos Santos

BELO HORIZONTE

2023

VITÓRIA RIBEIRO CANUTO

**CORRELAÇÃO ENTRE FORÇA (N) E FREQUÊNCIA (Hz) EM CORDAS DE AÇO
INOXIDÁVEL UTILIZADAS EM VIOLÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Eduardo dos Santos (Orientador)

Prof. Dra. Aline Silva Magalhães (CEFET/MG)

Prof. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa (CEFET/MG)

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais, Edmara e Antônio, por todo o apoio incondicional que me proporcionaram ao longo da minha vida, sempre me motivando e me inspirando.

Expresso minha gratidão ao Yan, por toda a parceria, apoio, encorajamento, sendo um suporte essencial ao longo dessa etapa.

Aos meus amigos e colegas da faculdade por compartilharem suas experiências, ideias e suporte, tornando esses 5 anos acadêmicos mais agradáveis e significativos.

Agradeço de maneira especial meu orientador Carlos Eduardo, por toda ajuda, sugestões, paciência e conhecimento que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Minha gratidão aos professores do DEMAT por suas contribuições durante discussões em sala de aula, contribuindo para meu crescimento profissional e pessoal.

RESUMO

Há milhares de anos a música está presente na sociedade como forma de expressão e comunicação humana, assim como a ciência. A engenharia desempenha um papel crucial na criação de instrumentos musicais, na produção e gravação musical, ambiente acústico e na busca por desenvolvimento de novos produtos que fazem com que ambas as áreas possam evoluir e se conectar. Não são encontrados muitos estudos e testes relacionados aos motivos pelos quais as cordas do violão, principal meio de propagação do som nos instrumentos de corda, rompem, podendo ser evitados em situações inusitadas como em shows e trabalhos ligados à música. Desta forma, o estudo tem como propósito investigar se a causa do rompimento das cordas de aço ocorre devido ao esforço axial constante sofrido pelos materiais. A investigação foi executada com o auxílio do ensaio de tração, gerando a curva de tensão x deformação, e da construção de um monocórdio, possibilitando relacionar frequência e força quando a afinação de cada corda foi atingida. Os resultados indicaram que a força necessária para alcançar as frequências dominantes das seis cordas de aço utilizadas no violão são inferiores aos resultados da força máxima obtidos por meio do ensaio de tração. A força necessária para afinação da 1ª corda correspondeu à 58% da força máxima obtida no ensaio de tração, sendo um valor médio aproximado de 114,98 N. Para a 2ª corda, a força necessária para afinação correspondeu a, aproximadamente, 31% da média de força máxima suportada pela corda no ensaio de tração. O valor médio da força máxima obtido para a 3ª corda foi igual a 166,90 N, e a força necessária para afinação correspondeu a, aproximadamente, 60% da força máxima. Para a 4ª corda, o valor médio da força máxima obtido foi de 204,44 N, sendo a força necessária para afinação correspondendo a aproximadamente 48% da força máxima. Para a 5ª e 6ª cordas, os valores médios foram de 242,93 N e 317,75 N, sendo a força necessária para afinação correspondendo a aproximadamente 32% e 20% da força máxima obtida no ensaio de tração da 5ª e 6ª cordas, respectivamente. Ademais, por meio das imagens geradas pela Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), constatou-se que a fratura das cordas de violão é dúctil, sendo perceptível um empescoamento nos pontos de máximos gerados após ensaio de tração.

Palavras chaves: cordas de aço; ensaio de tração; força máxima.

ABSTRACT

For thousands of years, music has been present in society as a form of expression and human communication, much like science. Engineering plays a crucial role in creating musical instruments, in music production and recording, in acoustic environments, and in the pursuit of developing new products that allow both fields to evolve and connect. There are not many studies and tests related to the reasons why guitar strings, the primary means of sound propagation in string instruments, break, potentially avoiding unexpected situations such as in concerts and music-related work. Thus, the study aims to investigate whether the cause of steel string breakage is due to the constant axial stress suffered by the materials. The investigation was carried out with the help of tensile testing, generating the stress-strain curve, and the construction of a monochord, allowing the correlation of frequency and force when tuning each string was achieved. The results indicated that the force required to reach the dominant frequencies of the six steel strings used in the guitar is lower than the maximum force results obtained through tensile testing. The force required for tuning the 1st string corresponded to 58% of the maximum force obtained in the tensile test, with an approximate average value of 114.98 N. For the 2nd string, the force required for tuning corresponded to approximately 31% of the average maximum force supported by the string in the tensile test. The average value of the maximum force obtained for the 3rd string was 166.90 N, and the force required for tuning corresponded to approximately 60% of the maximum force. For the 4th string, the average maximum force obtained was 204.44 N, with the force required for tuning corresponding to approximately 48% of the maximum force. For the 5th and 6th strings, the average values were 242.93 N and 317.75 N, with the force required for tuning corresponding to approximately 32% and 20% of the maximum force obtained in the tensile test of the 5th and 6th strings, respectively. Furthermore, through images generated by Scanning Electron Microscopy (SEM), it was observed that the fracture of guitar strings is ductile, with noticeable necking at the points of maximum strain generated after tensile testing.

Keywords: steel strings; tensile testing; maximum force.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Representação do instrumento berimbau com fixação de uma corda em duas extremidades.....	14
Figura 3.2 – Representação esquemática das partes de um violão.....	15
Figura 3.3 – Cordas de um encordoamento convencional de violão acústico.....	17
Figura 3.4 – Enrolamento de um fio em torno do núcleo hexagonal e redondo.....	18
Figura 3.5 – Microestrutura do aço inoxidável austenítico AISI 304.....	19
Figura 3.6 - Diferentes tipos de palhetas no mercado.....	20
Figura 3.7 – Frequência de um elástico em seu harmônico fundamental.....	21
Figura 3.8 – Ondas estacionárias em uma corda.....	22
Figura 3.9 – Diferentes tensões aplicadas nas cordas de um violão.....	22
Figura 3.10 – Tipos de vibração da corda do violão.....	23
Figura 3.11 – Medição da frequência por meio do aplicativo <i>gStings</i>	24
Figura 3.12 – Medição da frequência por meio de um afinador.....	24
Figura 3.13 - Ilustração representando Pitágoras realizando experimentos harmônicos com cordas vibrantes esticadas.....	26
Figura 3.14 – Equipamento para ensaio de tração.....	27
Figura 3.15 – Trinca por fadiga próximo a “A”.....	28
Figura 4.1 – Fluxograma geral do projeto.....	30
Figura 4.2 – Aplicativo para medição de frequência de cordas de violão.....	31
Figura 4.3 – Materiais utilizados para realização da medição da frequência e tensão no Monocórdio.....	32
Figura 4.4 – Representação da angulação de 45° em conjunto com a tarracha do violão.....	32
Figura 4.5 – Equipamento Ensaio de Tração.....	33
Figura 4.6 – Equipamento Microscopia Eletrônica de Varredura.....	34
Figura 4.7 – Microscópio Óptico.....	35
Figura 5.1 – Ruptura da 5ª corda após o ensaio de tração.....	38
Figura 5.2 – Ensaio de tração da 1ª corda.....	38
Figura 5.3 – Ensaio de tração da 2ª corda.....	39
Figura 5.4 – Ensaio de tração da 3ª corda.....	40
Figura 5.5 – Ensaio de tração da 4ª corda.....	41
Figura 5.6 – Ensaio de tração da 5ª corda.....	41
Figura 5.7 – Ensaio de tração da 6ª corda.....	42

Figura 5.8 – Ensaio de tração da 1ª corda.....	43
Figura 5.9– Ensaio de tração da 2ª corda.....	44
Figura 5.10 – Ensaio de tração da 3ª corda.....	44
Figura 5.11 – Ensaio de tração da 4ª corda.....	45
Figura 5.12 – Ensaio de tração da 5ª corda.....	46
Figura 5.13 – Ensaio de tração da 6ª corda.....	46
Figura 5.14 – Micrografias das amostras com ampliação de 200x	47
Figura 5.15 – Aço inoxidável AISI 302 da 6ª corda de aço Gianinni	49
Figura 5.16 – Especificação dos diâmetros das seis cordas de aço inoxidável	49
Figura 5.17 – Especificação dos diâmetros das seis cordas de aço inoxidável	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Composição das cordas de Aço do Violão.....	30
Tabela 5.1 – Resultados do 1º conjunto de cordas por meio do monocórdio.....	36
Tabela 5.2 – Resultados do 2º conjunto de cordas por meio do monocórdio.....	36
Tabela 5.3 – Força máxima das cordas do primeiro jogo.....	37
Tabela 5.4 – Força máxima das cordas do segundo jogo	43
Tabela 5.5 – Diâmetro do fio de aço inoxidável.....	51
Tabela 5.6 – Composição química do aço inoxidável AISI 302	52
Tabela 5.7 – Composição química do aço inoxidável AISI 304	52

LISTA DE SIGLAS

Cu	Cobre
Cr	Chromium
C	Carbono
Mn	Manganês
Ni	Níquel
O ₂	Oxigênio
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
HNO ₃	Ácido Nítrico
HCl	Ácido Clorídrico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVO	13
2.1	Objetivo Geral	13
2.2	Objetivos Específicos	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1	Instrumentos de cordas dedilhadas	14
3.1.1	<i>Cordas dedilhadas</i>	<i>16</i>
3.1.2	<i>Cordas de aço</i>	<i>17</i>
3.1.3	<i>Palhetas</i>	<i>20</i>
3.1.4	<i>Frequência das cordas</i>	<i>20</i>
3.1.5	<i>Métodos para medição de frequência</i>	<i>23</i>
3.2	Monocórdio	25
3.3	Desgaste	26
3.4	Ensaio de tração	27
3.5	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	28
4	MATERIAIS E MÉTODOS	30
4.1	Materiais	30
4.2	Métodos	30
4.2.1	<i>Construção do Monocórdio</i>	<i>31</i>
4.2.2	<i>Caracterização Mecânica</i>	<i>32</i>
4.2.3	<i>Caracterização</i>	<i>33</i>
4.2.4	<i>Análise dimensional</i>	<i>35</i>
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
5.1	Ensaio Monocórdio	36
5.2	Caracterização Mecânica	37
5.3	Análise Microestrutural	47
5.3.1	<i>Microscopia Eletrônica De Varredura (MEV)</i>	<i>47</i>
5.3.2	<i>Análise Metalográfica</i>	<i>48</i>
5.4	Análise Dimensional	49
6	CONCLUSÃO	53
7	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	54
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

1 INTRODUÇÃO

A música tem sido uma forma de expressão e comunicação humana, despertando emoções e inspirando sentimentos há milhares de anos. A ciência, por sua vez, busca compreender e explicar os fenômenos naturais e as leis que governam o universo.

A música e a engenharia, campos aparentemente distintos, compartilham uma relação. A engenharia desempenha um papel fundamental na criação e desenvolvimento de instrumentos musicais, na produção e gravação de música, além de contribuir para a melhoria da qualidade sonora em ambientes de apresentação e reprodução musical. O livro *"Musical Instrument Design: Practical Information for Instrument Making"* (1993), de Bart Hopkin, por exemplo, explora a relação entre música e engenharia, abordando técnicas e princípios utilizados na criação e construção de instrumentos musicais. A obra *"The Science of Sound"* (2020), de Rossing, Moore e Wheeler, explora detalhadamente os aspectos físicos do som e sua relação com a música, abordando desde a acústica de instrumentos musicais até a psicoacústica, que analisa a forma como o ouvido humano processa e interpreta os sons.

O objeto envolvido para emissão do som nos violões são as cordas. A vida útil desses componentes depende do material em que são confeccionados e das suas propriedades, considerando todos os meios em que os produtos são submetidos, como por exemplo a deformação ao serem tocadas e esticadas para chegar à afinação adequada, o desgaste provido do atrito entre o dedo, palheta e do contato entre a corda e os pontos de fixação no violão e oxidação proveniente do suor dos dedos e da atmosfera, podendo levar ao rompimento e inutilidade no instrumento.

Visando analisar se há a relação entre o rompimento das cordas e a deformação provida do estiramento ao serem afinadas no instrumento, foram realizados testes de tração e foi construído um monocórdio. Os testes de tração tiveram como objetivo a obtenção da curva tensão x deformação, enquanto o dispositivo construído (monocórdio) buscou a relação entre a força axial sofrida pela corda e frequência de afinação.

Para análise da força máxima suportada pelas amostras e observação do comportamento do aço, a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi efetuada. Ademais, a metalografia de uma amostra foi realizada para compreensão da microestrutura e morfologia dos grãos do aço utilizado.

Ao compreender a intersecção desses dois campos, pode-se obter uma visão abrangente da importância da engenharia no cenário musical, bem como suas aplicações práticas e potenciais para o futuro desenvolvimento dessas áreas.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

Investigar e caracterizar a resistência das cordas de aço utilizadas em violão, buscando compreender a relação da força máxima suportada pelas cordas e a força exercida para afinação de cada corda, associada ao rompimento do material.

2.2 Objetivos Específicos

- Fabricar um monocórdio para auxiliar os ensaios;
- Realizar testes experimentais em amostras de cordas de aço, submetendo-as ao esforço axial até a frequência de utilização no violão;
- Realizar ensaio de tração nas cordas (Mi), (Si), (Sol), (Ré), (Lá) e (Mi);
- Avaliar a relação entre a frequência e força das cordas (Mi), (Si), (Sol), (Ré), (Lá) e (Mi);
- Avaliar as amostras no Microscópio Eletrônica de Varredura, Microscópio Óptico e avaliação dimensional.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Instrumentos de cordas dedilhadas

Os instrumentos de cordas são aqueles cujo som é emitido por meio da vibração das cordas que são presas em duas extremidades. O berimbau, ilustrado na Figura 3.1, contém uma corda fixada em duas extremidades, o violão contém seis cordas fixadas e a harpa engloba mais de quarenta cordas fixadas entre duas extremidades. Esses são exemplos de instrumentos da família das cordas.

Figura 3.1 – Representação do instrumento berimbau com fixação de uma corda em duas extremidades



Fonte: InfoEscola, 2011.

Pedroso e Freitas (2021) definem que os instrumentos de cordas dedilhadas comunicam o som através da ressonância das cordas quando são perturbadas por uma fonte externa, ou seja, quando são deslocadas de sua posição de equilíbrio.

O violão é um instrumento musical de cordas dedilhadas da família dos cordófonos que possui seis ordens de cordas simples com comprimento acústico de 65,0 cm entre a pestana e o rastilho, afinadas geralmente nas notas mi, lá, ré, sol, si e mi com frequências iguais a 82 Hz, 110 Hz, 146 Hz, 196 Hz, 247 Hz e 330 Hz, respectivamente (ZACZÉSKI; BECKERT; BARROS; FERREIRA; FREITAS, 2018). O instrumento é usualmente confeccionado de madeira por profissionais denominados *Luthier*, sendo composto por uma caixa de ressonância, um braço e um conjunto de cordas que são tocadas com os dedos, com palheta ou plectros. Se tratando de ciência dos materiais, a construção do violão é um exemplo de como a escolha dos materiais pode afetar as propriedades acústicas de um instrumento.

A caixa de ressonância, indicada na Figura 3.2, é geralmente feita de madeira, capaz de produzir uma ressonância natural de alta qualidade. Segundo artigo publicado pelo Instrumentaria (2014), a seleção do tipo de madeira utilizada na fabricação da caixa de som desempenha um papel fundamental na definição do timbre e na capacidade do instrumento de projetar o som. Além disso, a excelência da madeira exerce um impacto direto na durabilidade e no desempenho do violão, sendo crucial a sua capacidade de vibrar com ampla intensidade e de resistir a deformações.

Figura 3.2 – Representação esquemática das partes de um violão



Fonte: MONTEIRO, 2019.

O braço do violão, apresentado também na Figura 3.2, é geralmente feito de madeira, mas também pode ser feito de outros materiais, como por exemplo a fibra de carbono. A escolha do material do braço pode influenciar na rigidez e na estabilidade do instrumento, afetando a precisão da afinação das cordas.

As cordas do violão também são um componente crítico do instrumento e sua escolha pode influenciar na qualidade do som produzido. As cordas podem ser fabricadas de diversos materiais, como nylon, aço e seda, possuindo características únicas com propriedades mecânicas e acústicas diferentes.

Segundo Oliveira (2014), o objetivo da maior parte dos fabricantes é produzir muitos instrumentos de qualidade aceitável a preços acessíveis. A seleção dos materiais é realizada com base em suas propriedades e custo. Neste sentido, as escolhas podem estar relacionadas a questões de um projeto básico de engenharia.

3.1.1 *Cordas dedilhadas*

Zaczéski et al. (2018) afirma que, de forma geral, o corpo do violão converte a oscilação transversal das cordas em uma onda longitudinal que se propaga pelo ar até chegar aos ouvidos do ouvinte. Para que esse processo ocorra, diversas partes do instrumento desempenham funções específicas e bem definidas, começando pelas cordas, o elemento responsável por gerar o som. As cordas do violão podem ser feitas de diversos materiais e aplicam uma força significativa no violão, podendo exceder 500 N. As cordas podem ser confeccionadas de diversos tipos de materiais tais como aço, nylon, níquel, prata, cobre, bronze, bronze/fósforo, latão e seda, entre outros, sendo o aço e o nylon frequentemente utilizados na fabricação do núcleo das cordas de violão.

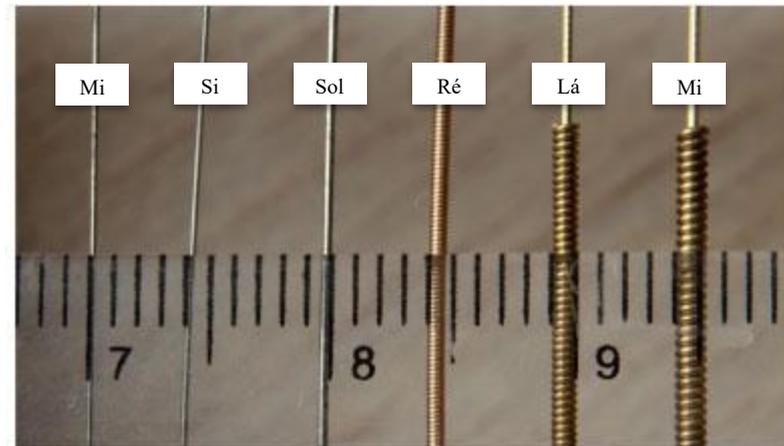
Segundo Pedroso et al. (2021), executar um som em uma corda implica em perturbá-la em sua posição neutra e, em seguida, soltá-la para induzir a vibração, como é comum em instrumentos como violões, guitarras, baixos elétricos, harpas e outros. Para realizar essa ação, conhecida como "ataque", podem ser empregados diversos artefatos, indo desde os próprios dedos das mãos até palhetas, que são dispositivos tipicamente em forma triangular desenvolvidos para auxiliar na geração de sons em tais instrumentos.

Conforme Oliveira (2014) descreve, as cordas empregadas em instrumentos de cordas dedilhadas precisam apresentar uma variedade de características que são essenciais para garantir a qualidade acústica desejada. A deformação das cordas pode prejudicar ou diminuir sua utilidade devido à alteração de suas propriedades, sendo necessário que elas tenham limite de escoamento elevado suficiente para permanecer no seu regime elástico durante o uso, evitando desgaste significativo, mantendo um diâmetro e densidade uniformes, e sendo resistentes a variações de temperatura e umidade. Além disso, é fundamental que as cordas sejam o mais flexíveis possível, suportando o desgaste causado pelo atrito dos dedos, palhetas ou dispositivos similares, bem como resistindo à corrosão. As especificações para a construção do instrumento e a escolha das cordas que visam transmitir o som para o ambiente podem ser desafiadoras de alcançar perfeitamente, mesmo com os avanços na ciência dos materiais.

Em um violão, é possível observar um aspecto relacionado à densidade linear das cordas: contando de baixo para cima, as três primeiras cordas são em geral de material maciço, um fio, e emitem um som agudo, enquanto as três últimas são confeccionadas com fios de diâmetros semelhantes aos das três primeiras cordas, porém possuem um revestimento enrolado nas cordas em forma helicoidal, semelhante ao apresentado na Figura 3.3, fazendo com que o som seja mais grave. De acordo com Catelli e Mussato (2014), o fio central mantém a tensão

das cordas mais espessas, ao passo que o fio enrolado adicional aumenta a densidade linear da massa (μ). O fio enrolado não impacta na tensão da corda, resultando na redução das frequências naturais de vibração da corda devido à introdução da massa adicional fornecida pelo fio enrolado. Conforme apresentado na Figura 3.3, é possível observar as variações dos diâmetros.

Figura 3.3 – Cordas de um encordoamento convencional de violão acústico



Fonte: CATELLI; MUSSATO, 2014.

Observa-se que as 3 primeiras cordas possuem somente o fio e as 3 últimas são envoltas por filamentos adicionais, denominados revestimento.

3.1.2 Cordas de aço

As cordas de aço são comumente utilizadas em violões de aço, também conhecidos como violões *western*, sendo fabricadas com filamento de aço que conferem maior resistência e produção de sons mais fortes, projetados. Schmidt (2022) afirma que a presença de uma maior porcentagem de carbono no aço confere maior resistência à oxidação, representando um importante diferencial na qualidade dos encordoamentos.

Segundo Darezzo (2019), no processo de fabricação das cordas, primeiramente se examina o núcleo do fio de aço através de um microscópio, que visualizados pela seção transversal podem ser hexagonais ou redondos, como demonstrado na Figura 3.4, para saber se não há nenhuma falha.

Figura 3.4 – Enrolamento de um fio em torno do núcleo hexagonal e redondo



Fonte: SCHMIDT, 2022.

Quando aprovado, o fio passa por um processo para medir a sua espessura, certificando que está no tamanho ideal. Em seguida, o aço passa por um processo de estiramento, utilizando uma série de ferramentas, para averiguar quanto o material consegue suportar até se romper. Posteriormente, os fios externos são enrolados em torno do núcleo central. Nesse processo, um fio de bronze, por exemplo, é enrolado ao longo de todo o núcleo, aprimorando a produção de tons mais graves.

Dentre os variados materiais de cordas de aço existentes, a Giannini, empresa brasileira fabricante de instrumentos musicais, possui um conjunto de cordas de aço inoxidável revestido de cobre prateado com um custo-benefício atraente para músicos na atualidade em que este trabalho está sendo elaborado, sendo estas cordas objeto de estudo deste trabalho.

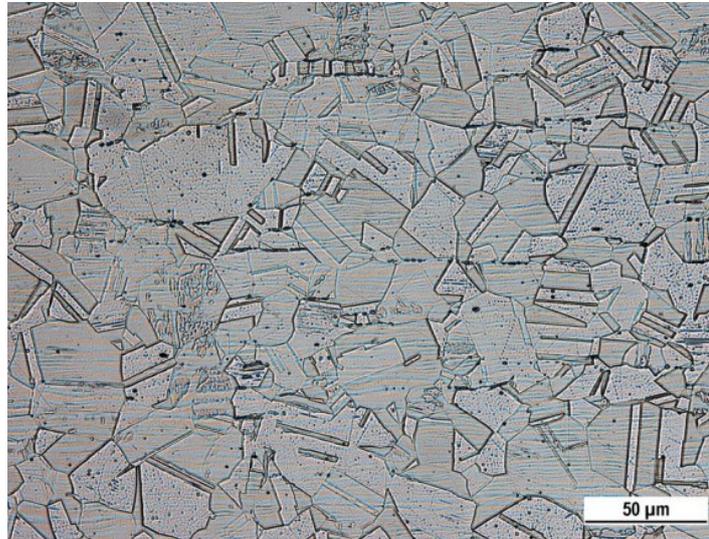
Tschiptschin e Pinedo (2010) definem que os aços inoxidáveis austeníticos são amplamente utilizados nas indústrias química, petroquímica, farmacêutica, alimentícia e de biotecnologia, onde sua utilização se deve à sua resistência à corrosão. A resistência à oxidação desse material se deve principalmente a presença do cromo (Cr), que em contato com o Oxigênio (O₂) e com uma determinada porcentagem, permite a formação de uma película de óxido de cromo sobre a superfície do aço, sendo impermeável e insolúvel nos meios corrosivos.

Segundo a empresa americana Penn Stainless Products, a liga de aço inoxidável AISI 302 é uma variação da liga austenítica com 18% de cromo e 8% de níquel, que é a liga mais familiar e amplamente utilizada na família do aço inoxidável. A liga AISI 302 é uma versão de carbono ligeiramente superior à AISI 304 e é comumente encontrada em forma de tira e fio. É uma classe tenaz e dúctil que é razoavelmente resistente à corrosão, não magnética e não pode ser endurecida por tratamento térmico.

Zatkalíková e Markoviová (2019) realizaram um estudo a respeito do aço inoxidável austenítico AISI 304 onde foi possível observar por meio da metalografia a microestrutura do material, podendo ser observado na Figura 3.5, grãos de austenita e maclas. O aço inoxidável

AISI 302 é semelhante ao AISI 304, fazendo com que a análise microestrutural se assemelhe, sendo também um aço inoxidável austenítico.

Figura 3.5 – Microestrutura do aço inoxidável austenítico AISI 304



Fonte: ZATKALÍKOVÁ e MARKOVIOVÁ, 2019.

Segundo a Multisom (2018), empresa do ramo fonográfico desde 1988, o acúmulo de suor e a oxidação do material alteram o timbre e a sonoridade do instrumento, reduzindo a vida útil das cordas. O processo de revestimento auxilia na prevenção da oxidação das cordas, prolongando a durabilidade de seus elementos e estendendo o intervalo entre as trocas.

3.1.3 Palhetas

As palhetas são acessórios utilizados para tocar violão e guitarra que ajudam a produzir um som mais nítido. Elas são geralmente confeccionadas de materiais como nylon, acrílico, celulose e metal. Na Figura 3.6 é possível observar alguns exemplos de palhetas encontradas no mercado.

Figura 3.6 - Diferentes tipos de palhetas no mercado



Fonte: Cifra Club, 2019.

Segundo Vicente (2018), a escolha da palheta correta pode fazer uma grande diferença no som produzido. As palhetas com menores espessuras são mais flexíveis e tendem a produzir um som mais suave e mais leve, enquanto as mais grossas, com espessuras maiores produzem um som mais forte e mais pesado.

3.1.4 Frequência das cordas

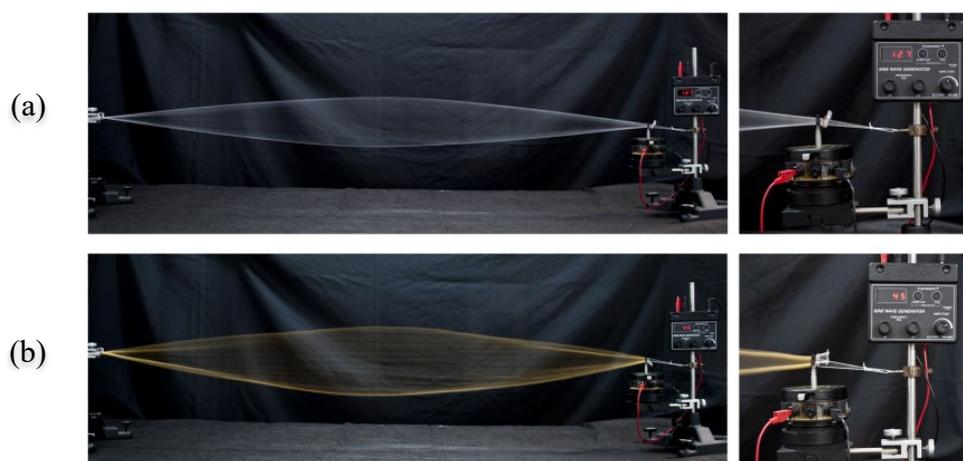
A frequência das cordas é um aspecto crucial para a qualidade sonora do violão, e é determinada principalmente pelo material da corda, comprimento e tensão aplicada. Segundo Henrique (2007), na acústica musical, uma corda ideal é concebida como sendo perfeitamente uniforme e flexível. Nesse cenário idealizado, a corda não apresenta rigidez à flexão, e a força que impulsiona sua vibração provém exclusivamente da tensão longitudinal externa aplicada. Embora essa idealização seja útil, ela difere das propriedades observadas em cordas reais, nas quais os efeitos da rigidez desempenham um papel significativo.

Catellil e Mussato (2014) inferem que a escolha do material e da espessura das cordas exerce uma influência significativa nas propriedades acústicas do violão. É amplamente reconhecido que cordas de maior calibre (diâmetro) tendem a produzir tonalidades com frequências naturais de vibração mais baixas, resultando em um som mais grave. Por outro lado,

cordas mais tensionadas geram frequências naturais mais elevadas, produzindo tonalidades agudas. Especificamente, as cordas graves, localizadas como as três últimas ao contar de baixo para cima, necessitam de maiores massas para manter a tensão da corda em níveis suficientemente altos para proporcionar mais volume ao violão.

O comprimento da corda, que é determinado pela distância entre as duas extremidades fixas, também afeta a frequência da corda. Quanto mais curta a distância, maior será a frequência da corda. Por meio de uma análise realizada por Naveda (2002), foi concluído que para o mesmo comprimento de corda, frequências mais baixas só podem ser alcançadas mediante a redução da tensão ou o aumento da massa específica. A Figura 3.7 ilustra a diferença da frequência com o aumento da densidade linear de um elástico sem revestimento e com revestimento.

Figura 3.7 – Frequência de um elástico em seu harmônico fundamental



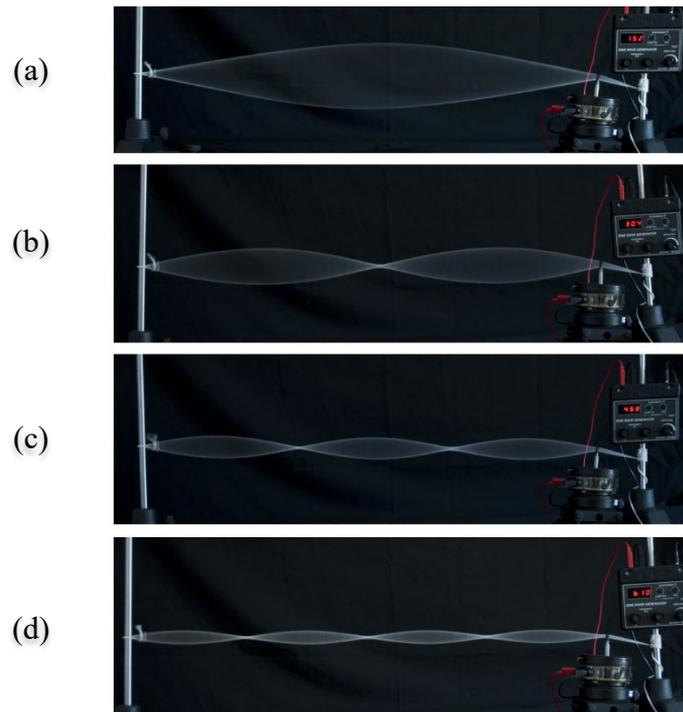
Na imagem (a) é apresentado um elástico sem revestimento. Na imagem (b) elástico com revestimento.

Fonte: CATELLIL; MUSSATO, 2014.

Segundo Catelli e Mussato (2014), na Figura 3.7 (a) o elástico oscila em seu harmônico fundamental, a uma frequência de $(12,7 \pm 0,6)$ Hz. Na Figura 3.7 (b) um elástico idêntico, revestido de uma mangueira de látex de modo a aumentar sua densidade linear (μ), oscila também no modo fundamental com uma frequência de $(4,5 \pm 0,4)$ Hz.

Outro estudo realizado por Catelli e Mussato (2014) demonstra as ondas estacionárias em uma corda de acordo com determinadas frequências e os harmônicos respectivos, representado na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Ondas estacionárias em uma corda

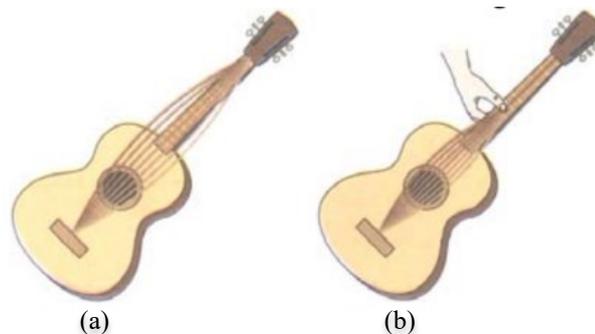


As frequências apresentadas são (a) 15,2 Hz; (b) 30,4 Hz;
(c) 45,8 Hz; (d) 61 Hz

Fonte: CATELLIL; MUSSATO, 2014.

Segundo Schulz (2008), a tensão aplicada às cordas exerce influência na frequência, sendo que cordas mais tensionadas resultam em um aumento da frequência. A Figura 3.9 (a) apresenta um exemplo de cordas no violão com aplicação de menor tensão, e a Figura 3.9 (b) aplicação de maior tensão.

Figura 3.9 – Diferentes tensões aplicadas nas cordas de um violão

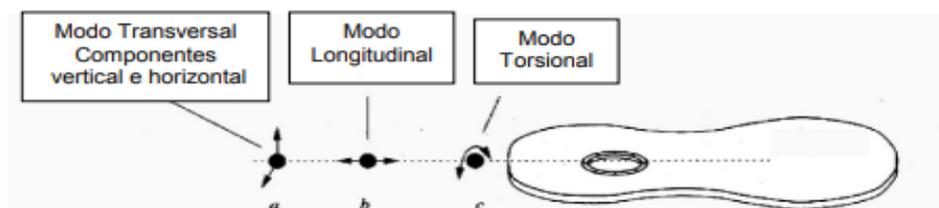


Fonte: SCHULZ, 2008.

No entanto, Schulz (2008) ressalta também que é importante observar que tensões elevadas podem acarretar a ruptura das cordas, uma vez que ficam sujeitas a uma tensão e desgaste intensos.

Uma corda pode vibrar segundo três modos vibratórios diferentes: transversal, longitudinal (ou axial) e torsional, como demonstrado na Figura 3.10. A cada um desses modos, está associada uma forma de vibração, uma frequência e um amortecimento específico (HENRIQUE, 2014).

Figura 3.10 – Tipos de vibração da corda do violão



As setas indicam as direções relacionadas com os modos de vibração da corda em um ponto imaginário da corda.

Fonte: NAVEDA (2002, p. 49).

Segundo Naveda (2002), as ondas longitudinais e torsionais não desempenham um papel relevante no processo de geração de som no violão, sendo que a quase totalidade da capacidade de excitar a corda está relacionada às ondas transversais.

3.1.5 Métodos para medição de frequência

A frequência de som é uma grandeza física, usada para medir o número de ciclos de uma onda sonora. Quanto maior o número de ciclos, medidos em Hertz, maior a frequência do som, sendo a frequência diretamente relacionada à altura, que determina sons graves e agudos: quanto maior a frequência, mais agudo será o som e quanto menor a frequência, mais grave ele será.

Naveda (2002) afirma que a frequência é estabelecida por meio da análise da pressão sonora emitida pela caixa de ressonância do violão enquanto uma força dinâmica senoidal, cuja frequência varia na faixa audível de 20 a 20.000 Hz, é aplicada ao instrumento. Essas medições proporcionam discernimentos sobre como a estrutura do violão responde a diferentes frequências, formando, de certa forma, a "assinatura" única do instrumento. Essa singularidade é derivada da configuração variável das áreas com maior ou menor resposta acústica, as quais são intrinsecamente influenciadas pelas características específicas dos materiais e da estrutura utilizados na fabricação de cada instrumento.

Em uma prática de laboratório realizada pela disciplina de Laboratório Integrado de Física Geral da Universidade Estadual de Londrina, Toginho Filho (2012), a frequência de um fio foi medida seguindo a metodologia no qual um fio esticado inextensível entre dois pontos

de apoio fixos, colocado para vibrar por um mecanismo interligado a um computador com aplicativo que controla frequência de oscilação para que fossem observadas as formações de interferência construtiva das ondas estacionárias para diferentes comprimentos e densidades lineares dos fios.

Em outro estudo realizado por Catelli e Mussato (2014), a frequência da corda foi medida e controlada de duas maneiras diferentes: por um aplicativo de *smartphone* chamado *gStrings*, sendo de uso livre e sem custos, e por um afinador conectado ao captador magnético do instrumento. As diferentes medições estão retratadas nas Figuras 3.11 e 3.12, respectivamente.

Figura 3.11 – Medição da frequência por meio do aplicativo *gStrings*



Fonte: CATELLIL; MUSSATO, 2014.

Figura 3.12 – Medição da frequência por meio de um afinador



Fonte: CATELLIL; MUSSATO, 2014.

No mesmo estudo realizado por Catellil e Mussato (2014), foi constatado por meio do instrumento projetado e apresentado nas Figuras 3.11 e 3.12, junto aos métodos de afinação e

auxílio da balança localizada na extremidade, que é possível medir valores de força concomitante à medição da frequência essencial de cada corda. Os resultados obtiveram uma consistência notável em relação aos fornecidos pelos fabricantes, geralmente na ordem de 70 N para as cordas Mi (330 Hz), feitas de metal maciço e com diâmetro de 0,254 mm, utilizando uma escala de comprimento padrão. É possível medir as tensões de operação de outras cordas, como as de nylon para violão clássico ou as encapadas para frequências mais baixas, com os dispositivos descritos anteriormente funcionando eficientemente nessas situações.

Portanto, existem várias formas de afinar o violão nas frequências corretas para cada corda, podendo ser com afinadores diretos ou indiretos (aplicativos), como mencionado, por meio da audição, com uma nota de referência, ou com os sons absolutos. Para a 1ª corda, tem-se que a frequência é 330 Hz, para a 2ª é igual a 247 Hz, 196 Hz para a 3ª corda, 146 Hz para a 4ª corda, 110 Hz para a 5ª corda e 82 Hz para a 6ª corda.

3.2 Monocórdio

As informações discutidas nesta seção foram obtidas a partir de um artigo de referência, elaborado na Universidade de Cambridge, na Inglaterra, Rees (2009).

O monocórdio é um instrumento de caráter tanto científico quanto musical de origem grega, desenvolvido por volta de 500 a.C. Foi concebido para a exploração e ilustração de fenômenos musicais e compreende uma corda metálica estendida sobre um corpo oco e ressonante. Mediante o uso de uma ponte móvel, a corda pode ser subdividida em duas partes cujos comprimentos são ajustáveis em diversas proporções, permitindo a produção de uma variedade de tons e intervalos musicais quando é tocada. Conforme a narrativa histórica, o renomado filósofo grego Pitágoras (vivo no século IV a.C.), representado na Figura 3.13, é creditado por ter identificado a relação existente entre proporções elementares no comprimento das cordas e os intervalos musicais consonantes.

Figura 3.13 - Ilustração representando Pitágoras realizando experimentos harmônicos com cordas vibrantes esticadas



Fonte: REES, 2009.

O monocórdio, no século XI, desempenhou um papel essencial como uma ferramenta de ensino musical sob a supervisão de Guido de Arezzo (c. 990-1050), um músico reconhecido por ter desenvolvido a primeira forma prática de notação musical. Ao dispor as notas de uma escala em um monocórdio, ele eficazmente instruiu os meninos do coro na arte do canto e na detecção de erros musicais. Além disso, o monocórdio serviu como um meio de ajuste para a afinação de instrumentos e permaneceu em uso até o século XIX para essa finalidade, especialmente na afinação de órgãos. Mais frequentemente, o monocórdio tem sido e continua a ser empregado com propósitos de demonstração.

3.3 Desgaste

O desgaste pode ser definido como a perda progressiva de um material causado pela interação entre duas superfícies, podendo ocorrer em diferentes escalas, desde a escala microscópica até a macroscópica, e pode ter um impacto significativo na vida útil e no desempenho de peças e equipamentos.

Segundo Schmidt (2022), as cordas tendem a acumular poeira e resíduos provenientes do contato com as mãos do violonista. Se esse cuidado for desconsiderado, as cordas não apenas terão uma vida útil reduzida, mas também há o risco de causar danos permanentes ao instrumento. O desgaste das cordas do violão é um fenômeno comum e inevitável que se manifesta à medida que as cordas são tocadas. Esse desgaste pode ser desencadeado por uma série de fatores, como a pressão dos dedos, a oxidação dos metais proveniente do suor e a fricção dos dedos e do atrito entre a palheta e as cordas durante a produção do som.

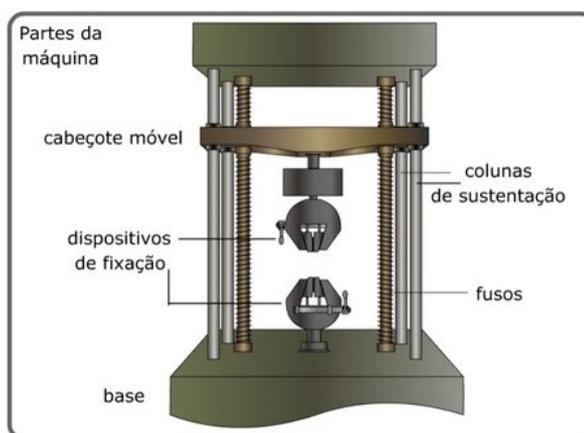
Há pessoas que optam por trocar as cordas do violão com maior regularidade, ao passo que outras preferem mantê-las por um período mais prolongado. No entanto, é vital recordar que cordas desgastadas ou envelhecidas podem ter um efeito substancial na qualidade do som gerado pelo violão.

O desgaste das cordas do violão é um fenômeno natural que ocorre com o uso contínuo do instrumento. Para minimizar o desgaste, Schmitd (2022) faz algumas recomendações, como manter as cordas limpas e lubrificadas e evitar exposição ao sol e umidade. Com esses cuidados, as cordas do violão podem ter uma vida útil mais longa e produzir um som de alta qualidade por mais tempo.

3.4 Ensaio de tração

O ensaio de tração consiste na aplicação de uma força de tração axial por meio de duas garras alinhadas, ilustrada na Figura 3.14, promovendo a deformação do material na direção do esforço, que tende a alongá-lo até fraturar. Por meio do ensaio é possível obter um gráfico de tensão versus deformação, e determinar algumas propriedades, como rigidez e resistência à tração do material.

Figura 3.14 – Equipamento para ensaio de tração



Fonte: CIMM.

O estudo do comportamento mecânico para análise do módulo de elasticidade de 4 amostras de cordas de guitarra foi realizado por Oliveira (2014) através do ensaio de tração, onde foram constatados comportamentos distintos para amostras de aço niquelado (NR), cordas de nano revestimento polimérico (PN), cordas de níquel puro (NW) e outra amostra de aço niquelado pertencente a outro fabricante (NP). Para as amostras de NP, NW e PN os resultados

de módulo de elasticidade estiveram em um intervalo comum de 204,61 GPa a 205,03 GPa. Para NR, foi encontrado o valor de 186,272 GPa.

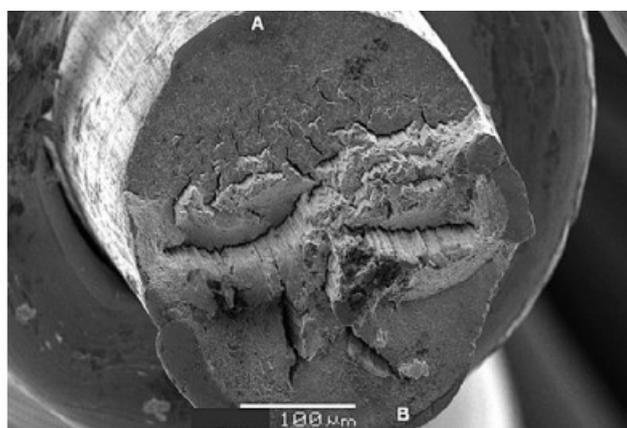
3.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Afinkko (2020) afirma que a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma técnica que envolve o uso de um feixe de elétrons focalizado para explorar a superfície da amostra. Durante essa interação com a matéria, vários tipos de sinais são gerados, permitindo a obtenção de informações relativas à morfologia e à composição química do material.

Durante a análise e estudo realizado por Oliveira (2014) a respeito de análise de quatro amostras de cordas de guitarra, NW (*nickel wound*): cordas de aço niquelado, PN (*pure nickel*): Cordas de níquel puro, NR (nano revestida): cordas com um nano revestimento polimérico de tecnologia antiferrugem para aços e NP (*nickel plated*): cordas de aço niquelado, foi necessário a investigação e constatação por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura de microconstituintes ou alterações na estrutura das cordas que demonstrassem e ajudassem na correlação com o módulo de elasticidade e na possível alteração estrutural após tratamentos térmicos realizados.

O ensaio de caracterização pelo Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) também foi importante para determinação da análise de trincas de fadiga transversais observadas por Olver, Wilson e Crofton (2007), em cordas de guitarra e bandolim. No ensaio foi possível observar marcas de trincas causadas por fadiga nas cordas, como evidenciado em “A” na Figura 3.15.

Figura 3.15 – Trinca por fadiga próximo a “A”



Fonte: OLVER; WILSON; CROFTON, 2006.

Por meio da análise de imagens do MEV, no estudo feito por Olver, Wilson e Crofton (2007), foi possível observar também características de plasticidade e empescoçamento de uma corda após um ensaio de tração realizado.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Para realização dos ensaios foram utilizadas seis cordas de aço novas do fabricante Giannini que possuem matéria prima conforme especificado pelo na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Composição das cordas de Aço do Violão

Tipo de Corda	Fabricante	Composição do Núcleo	Composição do Revestimento
Aço	Giannini	Aço Inoxidável AISI 302	Cobre Prateado

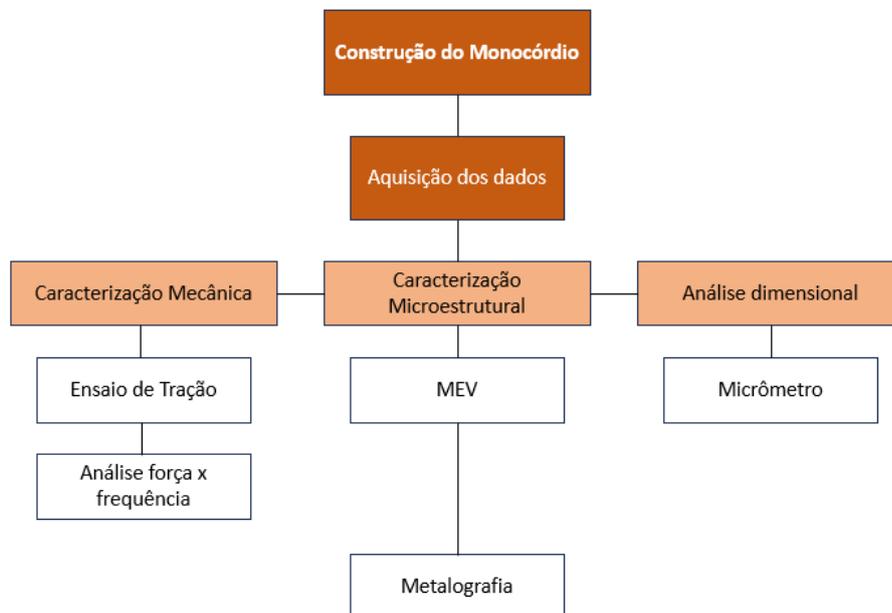
Fonte: FAYSANO, 2023.

No estudo foram utilizados dois jogos de cordas (J1 e J2) do mesmo fabricante contendo as mesmas características mencionadas.

4.2 Métodos

A Figura 4.1 fornece uma descrição geral das etapas e testes empregados neste estudo, com o intuito de apresentar uma visão completa das metodologias utilizadas.

Figura 4.1 – Fluxograma geral do projeto

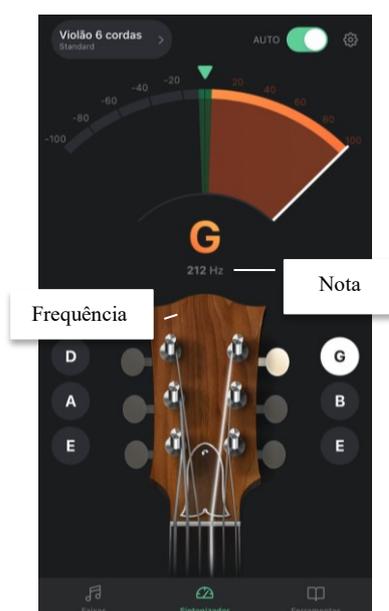


Fonte: Própria do autor, 2023.

4.2.1 Construção do Monocórdio

A construção do monocórdio foi realizada com o objetivo de possibilitar a relação entre a frequência das cordas, medida por meio do aplicativo *Turner Pro*, conforme ilustrado na Figura 4.2. Concomitante à medição da força foi utilizada a balança digital para que, na caracterização mecânica fosse possível relacionar a deformação das seis cordas à frequência que os instrumentos devem ser afinados.

Figura 4.2 – Aplicativo para medição de frequência de cordas de violão



Fonte: Própria do autor, 2023.

Para construção e realização do ensaio no monocórdio foram necessários os seguintes materiais:

- Braço de um violão;
- Barra de madeira;
- Chapa de metal;
- Balança portátil digital 50 kg (Besfter);
- Bloco de madeira para ponto de fixação;
- Aplicativo de Celular *Turner Pro*;
- Palheta polimérica (*Fender*);
- Objeto para orientação de angulação (45°);
- Dois jogos de cordas (Giannini).

A Figura 4.3 ilustra a montagem e os materiais utilizados no aparato.

Figura 4.3 – Materiais utilizados para realização da medição da frequência e tensão no Monocórdio



Fonte: Própria do autor, 2023.

As cordas foram tensionadas a cada, aproximadamente, 45° com o auxílio do objeto confeccionado de palitos de madeira, conforme mostrado na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Representação da angulação de 45° em conjunto com a tarracha do violão



Fonte: Própria do autor, 2023.

A tensão exercida foi interrompida uma vez que a frequência desejada foi alcançada de acordo com cada corda, dada a nota e frequências específicas encontradas na literatura.

4.2.2 Caracterização Mecânica

4.2.2.1 Ensaio de Tração

A fim de determinar a força máxima suportada por cada amostra, foi realizado o ensaio de tração.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Polímeros do DEMAT - CEFET-MG em uma máquina de tração da marca Shimadzu, modelo AG-x com capacidade de 10 kN, representada na Figura 4.5. A velocidade utilizada foi de 1 mm/min e a taxa de aquisição de dados foi de 100 coletas/min.

Figura 4.5 – Equipamento Ensaio de Tração



Fonte: Própria de autor, 2023.

Foi realizado um ensaio de cada amostra, totalizando doze amostras, sendo seis do primeiro jogo e seis do segundo jogo. Os resultados foram obtidos separadamente uma vez que foi considerado que cada jogo de corda pode conter características distintas.

4.2.3 Caracterização

4.2.3.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Com o objetivo de observar e avaliar a morfologia e características com maior detalhamento do local de ruptura das cordas após a realização do ensaio de tração, foi realizado ensaio de microscopia no Laboratório de Caracterização do DEMAT – CEFET-MG em um microscópio da marca Shimadzu, modelo Superscan SS-550 representada na Figura 4.6.

Figura 4.6 – Equipamento Microscopia Eletrônica de Varredura



Fonte: Própria de autor, 2023.

O ensaio foi realizado em três amostras de diferentes diâmetros do primeiro jogo ensaiado, sendo a 1ª corda com o menor diâmetro (0,28 mm), a 3ª corda com o diâmetro externo intermediário (0,58 mm) e a 6ª corda com o maior diâmetro externo (1,14 mm).

4.2.3.2 Metalografia

Com a finalidade de observar e avaliar a microestrutura do aço inoxidável, primeiramente foi feito o embutimento a quente de uma amostra do aço no laboratório de metalografia do DEMAT – CEFET-MG.

Posteriormente, a amostra foi lixada nas lixas de #240, #400 e #600 e polida na politriz lixadeira metalográfica com a pasta de diamante (3 μ m e 1 μ m).

Para revelação da microestrutura e melhor visualização dos grãos, foi necessário o ataque químico com a Água Régia, sendo sua formulação igual a 3HCl:1HNO₃. A análise microscópica foi realizada em seguida no Laboratório de Metalografia do DEMAT – CEFET-MG no microscópio óptico da marca ZEISS, representado na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Microscópio Óptico



Fonte: Própria do autor, 2023.

A partir da visualização, foi possível caracterizar e visualizar os grãos presentes no aço utilizado no estudo.

4.2.4 *Análise dimensional*

Com o propósito de verificar o diâmetro interno das cordas revestidas após as caracterizações mecânicas e microestruturais, foi realizada uma análise dimensional das amostras com o auxílio do micrômetro analógico (0 a 25 mm) da marca Mitutoyo, representado na Figura 4.8.

Figura 4.8 – Micrômetro analógico



Fonte: Própria do autor, 2023.

Para as cordas com revestimento, o fio foi desenrolado manualmente, sendo possível a medição do diâmetro interno.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Ensaio Monocórdio

O ensaio realizado no monocórdio possibilitou a avaliação da relação entre a força a qual a corda estava sendo submetida e a frequência até o ponto de afinação associada à cada corda (Mi), (Si), (Sol), (Ré), (Lá) e (Mi). Os resultados obtidos do 1º e 2º conjunto estão descritos na Tabela 5.1 e 5.2 respectivamente.

Tabela 5.1 – Resultados do 1º conjunto de cordas por meio do monocórdio

Corda	Diâmetro (mm)	Força (N)	Frequência (Hz)
1ª (Mi)	0,28	68,061	330
2ª (Si)	0,36	65,023	247
3ª (Sol)	0,58	99,666	196
4ª (Ré)	0,76	100,058	146
5ª (Lá)	0,94	80,605	110
6ª (Mi)	1,14	64,533	82

Fonte: Própria do autor, 2023.

Tabela 5.2 – Resultados do 2º conjunto de cordas por meio do monocórdio

Corda	Diâmetro (mm)	Força (N)	Frequência (Hz)
1ª (Mi)	0,28	67,473	330
2ª (Si)	0,36	68,257	247
3ª (Sol)	0,58	99,47	196
4ª (Ré)	0,76	98,098	146
5ª (Lá)	0,94	82,663	110
6ª (Mi)	1,14	66,101	82

Fonte: Própria do autor, 2023.

As discussões e os resultados obtidos no monocórdio que foram discutidos se baseiam no cálculo da força média (N) entre o primeiro e segundo jogo, compreendidas entre as Tabelas 5.1 e 5.2.

É possível observar que para a 1ª corda, cujo diâmetro é 0,28 mm, a força média foi de 67,76 N na frequência especificada de 330 Hz. Para a 2ª corda com diâmetro igual a 0,36 mm, a força média calculada na frequência de 247 Hz foi de 66,64 N. A 3ª corda, sendo a 1ª corda em ordem crescente que possui revestimento, apresentou uma força média para a frequência de 196 Hz de 99,57 N. Para a 4ª corda cujo diâmetro é de 0,76 mm, a força média encontrada foi de 99,08 N, sendo a frequência relacionada igual a 146 Hz. Observa-se que para a 5ª corda, cuja frequência é de 110 Hz, a força média encontrada foi 81,63 N. Já para a 6ª

corda, cujo diâmetro é o maior do conjunto sendo 1,14 mm, a força média calculada foi de 65,13 N.

É possível observar que há um decaimento da frequência à medida que o diâmetro das cordas aumenta, ou seja, para a 1ª corda com o menor diâmetro a frequência é maior, e para a última corda com o maior diâmetro, a frequência dada é a menor do conjunto. Esse fato se dá devido à adição de massa das cordas fazendo com que as frequências naturais de oscilação da corda diminuam, sendo que para a 3ª, 4ª, 5ª e 6ª corda o aumento de massa se dá pelo fio enrolado, o revestimento.

Para a força medida e observada não cabe uma relação direta com o aumento ou decaimento da frequência e diâmetro das seis cordas uma vez que a parte responsável pela resistência é fio central (aço), sendo individual para cada corda ensaiada. Para a 6ª corda, por exemplo, cujo diâmetro externo é o maior de 1,14 mm, espera-se uma força maior, porém o revestimento adicionado se trata de um fio enrolado de forma helicoidal que não confere maior ou menor força, e sim aumento da densidade e mudança na tonalidade, influenciando na sonoridade final do instrumento quando tocado.

5.2 Caracterização Mecânica

Para análise da força máxima e correlação da força na determinada frequência de cada corda, foram realizados testes de tração nos dois jogos ensaiados previamente no monocórdio, fazendo com que a relação fosse possível de ser observada nos gráficos de força x deslocamento. Na Tabela 5.3 é possível observar a força máxima suportada de cada corda para o 1º jogo ensaiado.

Tabela 5.3 – Força máxima das cordas do primeiro jogo

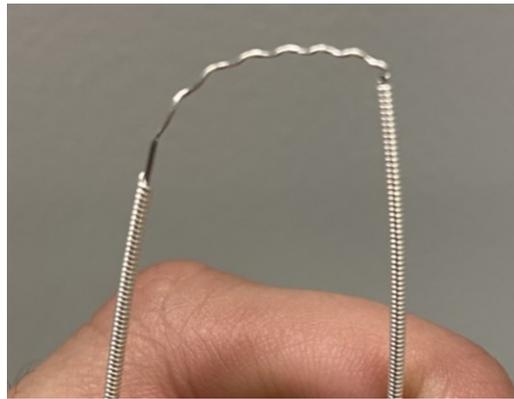
Corda	Força (N)	Diâmetro (mm)
1ª (Mi)	114,79	0,28
2ª (Si)	215,65	0,36
3ª (Sol)	156,64	0,58
4ª (Ré)	198,87	0,76
5ª (Lá)	231,44	0,94
6ª (Mi)	300,07	1,14

Fonte: Própria do autor, 2023.

Observou-se que com o aumento do diâmetro não houve aumento crescente da força desde a 1ª corda até a última (1ª a 6ª), sendo que da 1ª para a 2ª corda houve aumento de aproximadamente 100,86 N, porém da 2ª para a 3ª corda houve um decréscimo da força de

aproximadamente 59,01 N, o que não é esperado à uma primeira visão quando comparado ao aumento do diâmetro de uma corda para a outra. Porém, o que confere a resistência as cordas é o aço inoxidável, presente nas duas primeiras cordas sem revestimento, e a partir da 3ª corda presente como o miolo, sendo revestidas de bronze prateado na forma helicoidal. Na Figura 5.1 é possível observar que a ruptura da corda revestida após o ensaio de tração ocorreu apenas no aço, sendo o revestimento desenvolvido do miolo e não rompido.

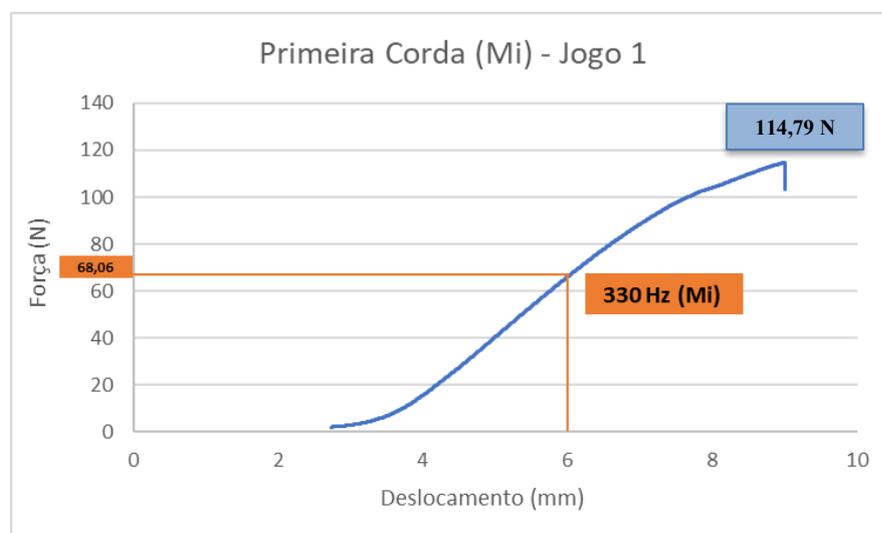
Figura 5.1 – Ruptura da 5ª corda após o ensaio de tração



Fonte: Própria do autor, 2023.

Para análise das curvas de força x deslocamento das cordas, foram traçados os gráficos de força (N) versus deslocamento (mm) do primeiro jogo representados nas Figuras 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7.

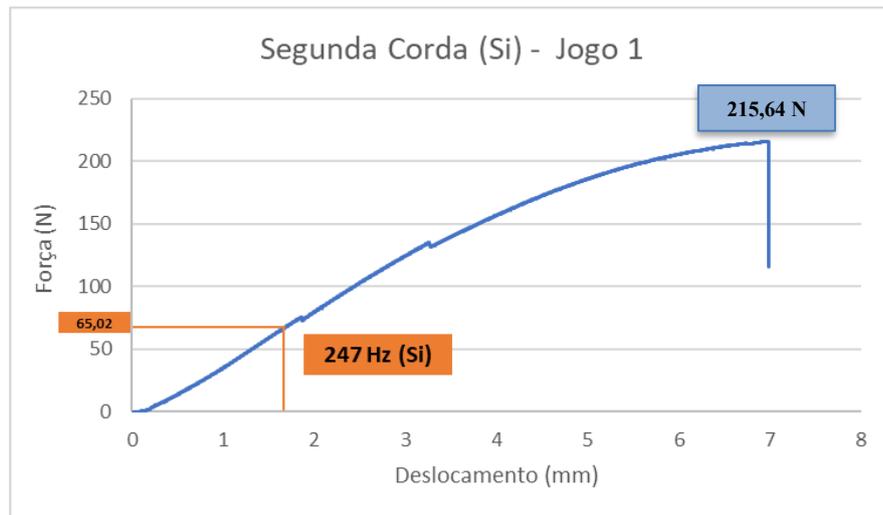
Figura 5.2 – Ensaio de tração da 1ª corda



Fonte: Própria do autor, 2023.

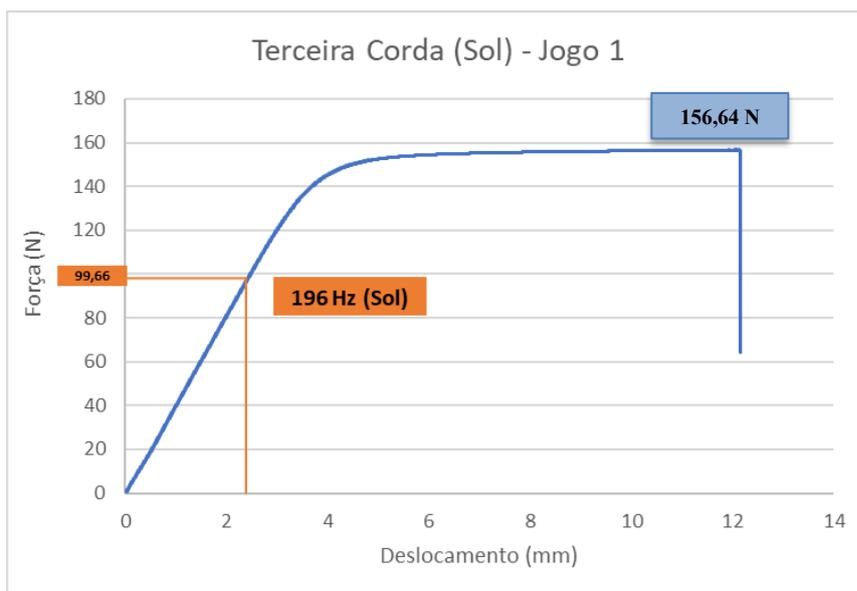
Após o ensaio de tração da 1ª corda, foram traçadas 2 linhas correspondentes a força medida e especificada no ensaio do monocórdio uma vez que a frequência de 330 Hz da 1ª corda foi alcançada. Observou-se que a força necessária para afinação da corda de 68,06 N corresponde à 59% da força máxima suportada no ensaio de tração, de aproximadamente 114,79 N. Sendo assim para romper uma corda por excesso de carga tocando ou afinando o instrumento, é necessário ultrapassar em média 41% da força necessária para afinar a 1ª corda (Mi).

Figura 5.3 – Ensaio de tração da 2ª corda



Fonte: Própria do autor, 2023.

Após a realização do ensaio de tração na 2ª corda, foram desenhadas duas linhas que representam a força medida, alinhadas com as especificações do ensaio no monocórdio, uma vez que a frequência de 247 Hz da 2ª corda foi atingida. No ensaio de tração observou-se que a força máxima foi de aproximadamente 215,64 N, e a força necessária para afinação de 65,02 N, o que corresponde a 30% da força máxima obtida no ensaio de tração. Sendo assim para romper uma corda por excesso de carga tocando ou afinando o instrumento, é necessário ultrapassar em média 70% da força necessária para afinar a 2ª corda (Si).

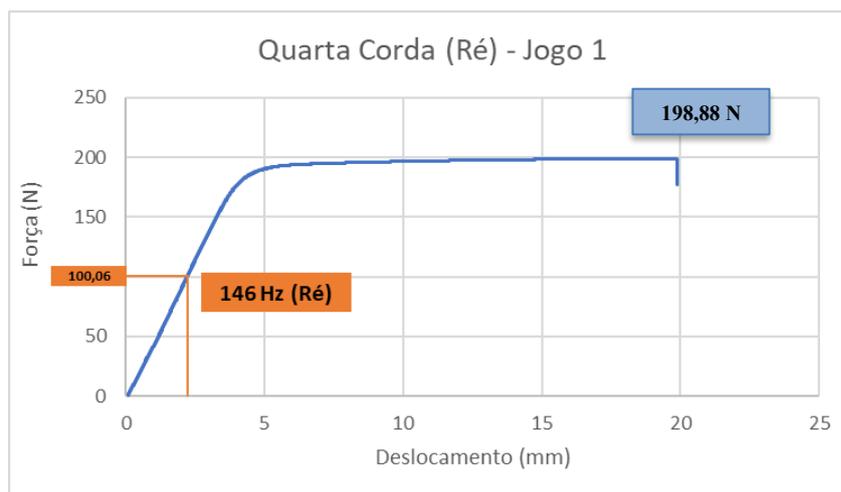
Figura 5.4 – Ensaio de tração da 3ª corda

Fonte: Própria do autor, 2023.

No ensaio realizado na 3ª corda, observou-se um patamar cujo deslocamento se estende até próximo a 12 mm, onde ocorre a ruptura tendo uma força máxima de aproximadamente 156,64 N. Porém, considerando o diâmetro de uma corda de violão sendo relativamente pequeno, a estricção do material não apresentaria tal comportamento como demonstrado no gráfico, sugerindo que houve um escorregamento do material após atingir o regime plástico. O escorregamento apresentado na Figura 5.4 está ligado ao modo de fixação de algumas cordas no ensaio de tração, onde foram pressionadas por duas placas de alumínio sendo que, em alguns casos, houve o deslizamento entre as placas podendo ser observado também em outros ensaios de tração no decorrer do trabalho.

Observou-se que a força necessária para afinação da corda de 99,66 N corresponde à 64% da força máxima suportada no ensaio de tração, de aproximadamente 156,64 N. Sendo assim para romper uma corda por excesso de carga tocando ou afinando o instrumento, é necessário ultrapassar em média 36% da força necessária para afinar a 3ª corda (Sol).

Figura 5.5 – Ensaio de tração da 4ª corda

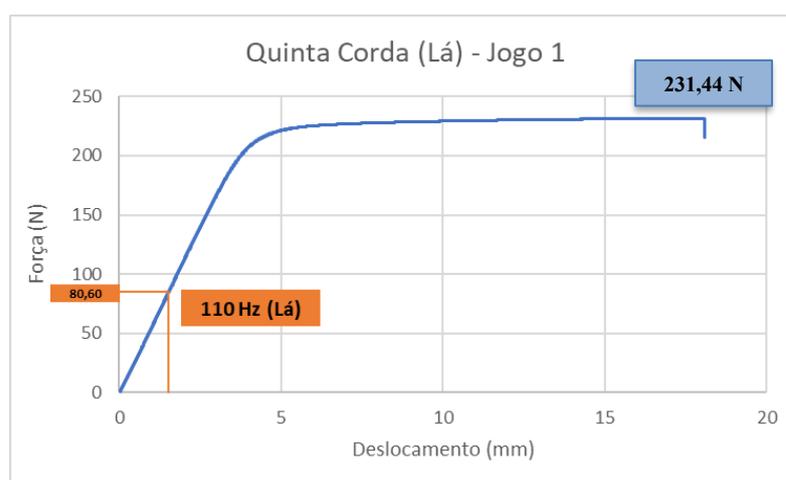


Fonte: Própria do autor, 2023.

Durante o ensaio realizado na 4ª corda, foi observado o mesmo comportamento mencionado anteriormente para a 3ª corda, com o deslocamento se estendendo até cerca de 20 mm, culminando na ruptura a uma força de aproximadamente 198,88 N. No entanto, ao considerar o diâmetro da corda, a curva não deveria manifestar esse comportamento, indicando que houve escorregamento do material após atingir o regime plástico.

Foram desenhadas linhas que representam a força medida e especificada no ensaio do monocórdio, uma vez que a frequência de 146 Hz da 4ª corda foi alcançada. É possível notar uma considerável diferença entre a força máxima e a força necessária para a afinação da corda, apresentando uma diferença de aproximadamente 50%. Sendo assim, para romper uma corda por excesso de carga tocando ou afinando o instrumento, é necessário ultrapassar em média 50% da força necessária para afinar a 4ª corda (Mi).

Figura 5.6 – Ensaio de tração da 5ª corda



Fonte: Própria do autor, 2023.

Para o ensaio realizado na 5ª corda, o patamar citado para a 3ª e 4ª corda permaneceu, sendo o deslocamento estendido até próximo a 20 mm, onde ocorre a ruptura a uma força aproximada de 231,44 N. No entanto, levando em conta o diâmetro da corda, a estrição do material não demonstraria esse comportamento, indicando um deslizamento do material após atingir o regime plástico

Observou-se que a força necessária para afinação da corda de 80,60 N corresponde à 35% da força máxima suportada no ensaio de tração, de aproximadamente 231,44 N. Sendo assim para romper uma corda por excesso de carga tocando ou afinando o instrumento, é necessário ultrapassar em média 65% da força necessária para afinar a 5ª corda (Lá).

Figura 5.7 – Ensaio de tração da 6ª corda



Fonte: Própria do autor, 2023.

No ensaio realizado na 6ª corda, o patamar citado para a 3ª, 4ª e 5ª corda permaneceu, sendo o deslocamento estendido até próximo a 16 mm, onde ocorre a ruptura a uma força aproximada de 300,10 N. Contudo, ao considerar o diâmetro da corda, a estrição do material não evidenciaria tal comportamento, apontando para a possibilidade do escorregamento da corda após atingir o regime plástico

Observou-se que a força necessária para afinação da corda de 64,53 N corresponde à 22% da força máxima suportada no ensaio de tração, de aproximadamente 300,10 N. Sendo assim para romper uma corda por excesso de carga tocando ou afinando o instrumento, é necessário ultrapassar em média 78% da força necessária para afinar a 6ª corda (Mi).

Na Tabela 5.4 é possível observar os valores máximos de cada corda para o segundo jogo ensaiado.

Tabela 5.4 – Força máxima das cordas do segundo jogo

Corda	Força (N)	Diâmetro (mm)
1ª (Mi)	115,17	0,28
2ª (Si)	207,02	0,36
3ª (Sol)	177,13	0,58
4ª (Ré)	210,00	0,76
5ª (Lá)	254,41	0,94
6ª (Mi)	335,42	1,14

Fonte: Própria do autor, 2023.

A mesma observação realizada para o primeiro jogo ensaiado pode ser descrita para o segundo jogo sendo observado que, com o aumento do diâmetro não houve aumento crescente da força desde a 1ª corda até a última (1ª a 6ª), sendo que da 1ª para a 2ª corda houve aumento de aproximadamente 91,85 N, porém da 2ª para a 3ª corda houve um decréscimo da força de aproximadamente 29,89 N, o que não é esperado à uma primeira visão uma vez comparado ao aumento do diâmetro de uma corda para a outra.

Para análise das curvas de tensão x deformação das cordas, foram traçados os gráficos de força (N) versus deslocamento (mm) do segundo jogo representados nas Figuras 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13.

Figura 5.8 – Ensaio de tração da 1ª corda

Fonte: Própria do autor, 2023.

Após o ensaio de tração da 1ª corda, foram traçadas 2 linhas correspondentes a força medida e especificada no ensaio do monocórdio uma vez que a frequência de 330 Hz da 1ª corda foi alcançada. Observou-se que a força necessária para afinação da corda de 67,47 N corresponde à 59% da força máxima suportada no ensaio de tração, de aproximadamente 115,17 N. Sendo assim para romper uma corda por excesso de carga tocando ou afinando o

instrumento, é necessário ultrapassar em média 41% da força necessária para afinar a 1ª corda (Mi).

Figura 5.9– Ensaio de tração da 2ª corda



Fonte: Própria do autor, 2023.

Após o ensaio de tração da 2ª corda, foram traçadas 2 linhas correspondentes a força medida e especificada no ensaio do monocórdio uma vez que a frequência de 247 Hz da 2ª corda foi alcançada. No ensaio do monocórdio observou-se que a força necessária para afinação foi de aproximadamente 68,26 N, o que corresponde a 33% da força máxima obtida no ensaio de tração, de aproximadamente 207,02 N. Sendo assim para romper uma corda por excesso de carga tocando ou afinando o instrumento, é necessário ultrapassar em média 67% da força necessária para afinar a 2ª corda (Si).

Figura 5.10 – Ensaio de tração da 3ª corda

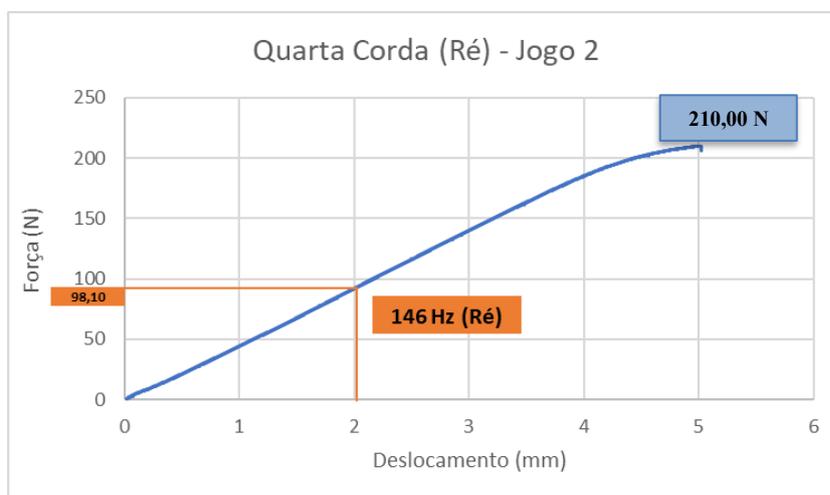


Fonte: Própria do autor, 2023.

No ensaio realizado na 3ª corda do segundo conjunto, não foi identificado o mesmo patamar que indicaria escorregamento, conforme observado no gráfico correspondente à 3ª corda do primeiro conjunto. O deslocamento para o segundo conjunto foi de cerca de 5 mm, em contraste com o primeiro conjunto, que alcançou aproximadamente 12 mm.

Foram desenhadas linhas representando a força medida e a especificada no ensaio do monocórdio, uma vez que a frequência de 196 Hz da 3ª corda foi alcançada. A força necessária para afinação da corda foi de 99,47 N, o que corresponde à 56% da força máxima encontrada no ensaio de tração, de aproximadamente 177,14 N. Sendo assim para romper uma corda por excesso de carga tocando ou afinando o instrumento, é necessário ultrapassar em média 44% da força necessária para afinar a 3ª corda (Sol).

Figura 5.11 – Ensaio de tração da 4ª corda

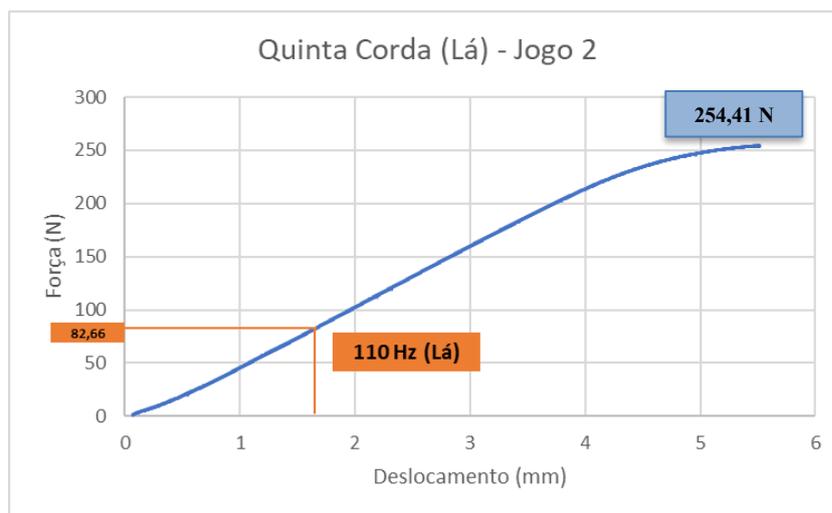


Fonte: Própria do autor, 2023.

O desempenho do ensaio de tração na 4ª corda do segundo conjunto apresentou variações em relação ao ensaio realizado no primeiro conjunto, uma vez que não foi identificado um deslocamento prolongado. Dessa maneira, infere-se que não ocorreu escorregamento neste ensaio.

A força necessária para afinação da corda foi de 98,10 N, o que corresponde à 47% da força máxima encontrada no ensaio de tração, de aproximadamente 210,00 N. Sendo assim para romper uma corda por excesso de carga tocando ou afinando o instrumento, é necessário ultrapassar em média 53% da força necessária para afinar a 4ª corda (Ré).

Figura 5.12 – Ensaio de tração da 5ª corda

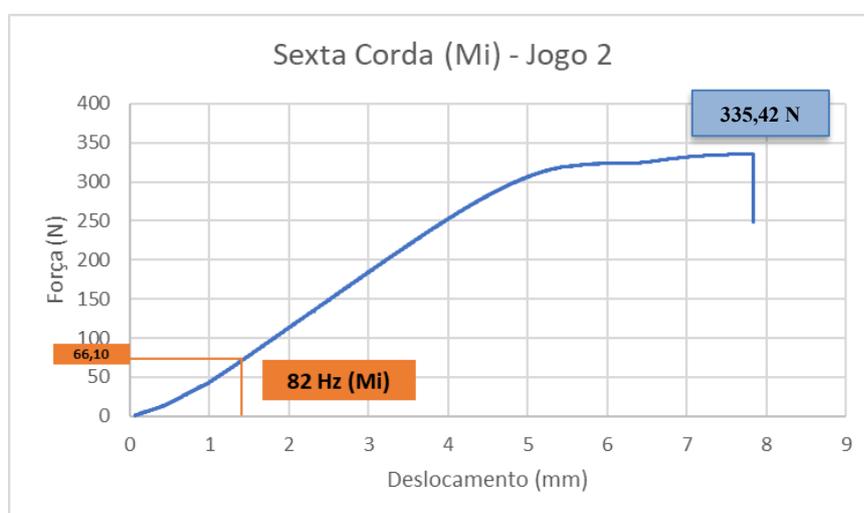


Fonte: Própria do autor, 2023.

O desempenho do ensaio de tração na 5ª corda do segundo conjunto apresentou diferenças em relação ao ensaio realizado no primeiro conjunto, uma vez que não foi identificado o deslocamento prolongado, deduzindo que não houve escorregamento da amostra neste ensaio.

A força necessária para afinação da corda foi de 82,66 N, o que corresponde à 32% da força máxima encontrada no ensaio de tração, de aproximadamente 254,41 N. Sendo assim para romper uma corda por excesso de carga tocando ou afinando o instrumento, é necessário ultrapassar em média 68% da força necessária para afinar a 5ª corda (Lá).

Figura 5.13 – Ensaio de tração da 6ª corda



Fonte: Própria do autor, 2023.

O resultado do ensaio de tração da 6ª corda do segundo jogo foi semelhante ao apresentado no primeiro jogo, uma vez que também houve um deslocamento estendido não esperado para o diâmetro da corda, inferindo-se que houve um escorregamento dessa corda para esse ensaio.

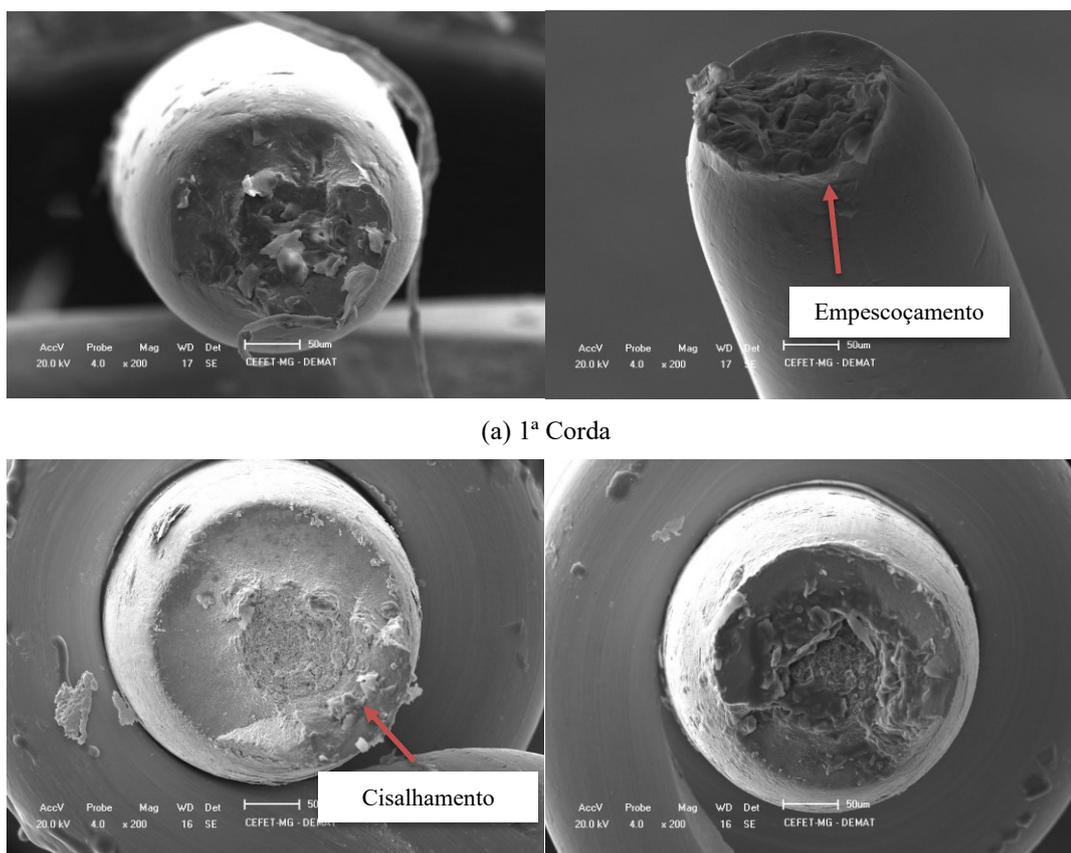
A força necessária para afinação da corda foi de 66,10 N, o que corresponde à 20% da força máxima encontrada no ensaio de tração, de aproximadamente 335,42 N. Sendo assim para romper uma corda por excesso de carga tocando ou afinando o instrumento, é necessário ultrapassar em média 80% da força necessária para afinar a 6ª corda (Mi).

5.3 Análise Microestrutural

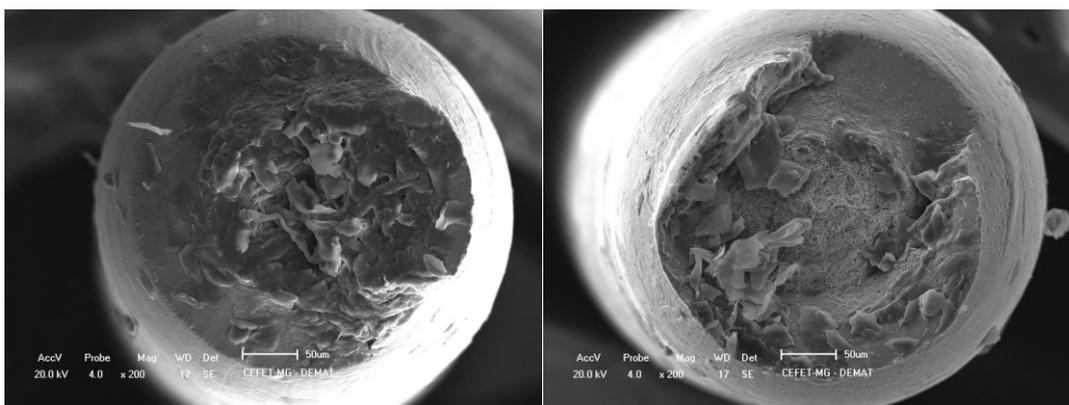
5.3.1 Microscopia Eletrônica De Varredura (MEV)

Após os ensaios de tração realizados, foram feitos os ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) de 3 amostras do primeiro jogo, sendo micrografias realizadas na seção transversal da 1ª corda (menor diâmetro externo igual a 0,28 mm), 3ª corda (diâmetro externo médio igual a 0,58 mm) e 6ª corda (maior diâmetro externo, medindo 1,14 mm). As imagens captadas estão ilustradas na Figura 5.14.

Figura 5.14 – Micrografias das amostras com ampliação de 200x



(b) 3ª Corda



(c) 6ª Corda

Fonte: Própria do autor, 2023

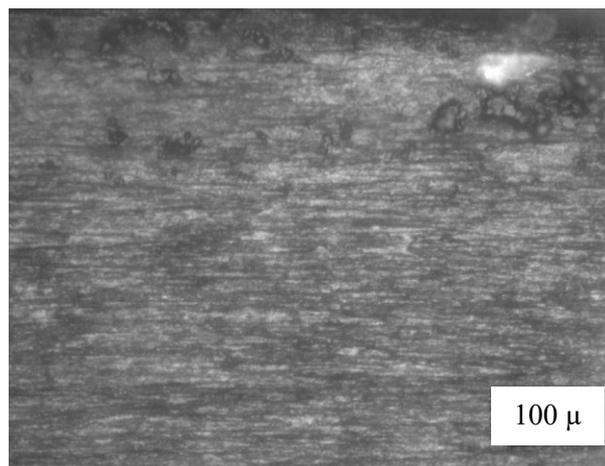
Foi possível observar, com o auxílio das imagens geradas pelo MEV, um empescoamento referente à um comportamento dúctil do aço indicada pela seta vermelha na Figura 5.14 (a) relativo à 1ª corda, sendo esse desempenho estendido para as demais cordas. A presença de uma estricção no ensaio de tração é uma indicação visual de que o material passou da fase elástica e está sofrendo deformação plástica. Por meio dos gráficos e análise das micrografias, foi possível notar que a razão do diâmetro nominal e o diâmetro referente à estricção foi próxima à 0,9, o que é compatível com o que se espera da corda de violão, uma vez que a deformação permanente para essa finalidade não é requerida devido as perturbações que as cordas sofrem ao longo do tempo.

Ademais, na Figura 5.14 (b) referente à 3ª corda, foi possível identificar o esforço de cisalhamento indicado pela seta vermelha, indicando também que o material não sofreu uma fratura frágil.

5.3.2 *Análise Metalográfica*

Para análise e identificação da microestrutura do aço inoxidável austenítico que constitui as cordas de aço do violão Giannini, foi realizada a análise metalográfica no microscópio. A microestrutura está apresentada na Figura 5.15.

Figura 5.15 – Aço inoxidável AISI 302 da 6ª corda de aço Gianinni



Fonte: Própria do autor, 2023.

Foi possível observar o alongamento dos grãos devido ao processo de conformação de trefilação realizado para confecção das cordas, não sendo possível identificar o contorno nítido dos grãos da austenita.

5.4 Análise Dimensional

As embalagens externas dos jogos de cordas utilizadas contêm o diâmetro disponibilizado pelo fabricante, como ilustrado no destaque da Figura 5.16 e incluídos nas tabelas de caracterização mecânica.

Figura 5.16 – Especificação dos diâmetros das seis cordas de aço inoxidável

Cordas/ Strings		mm	inch
Prata/ Silver	1ª E-MI	0.28	0.011
Roxo/ Purple	2ª B-SI	0.36	0.014
Verde/ Green	3ª G-SOL	0.58	0.023
Preto/ Black	4ª D-RÉ	0.76	0.030
Vermelho/ Red	5ª A-LÁ	0.94	0.037
Bronze/ Brass	6ª E-MI	1.14	0.045

Medidas para uso em escala com comprimento de 648mm / 25.5"

Gianni S/A - Av. Tranquilo Gianni, 700
CEP 13329-900 - Salto - SP
CNPJ 61.196.119/0001-76 - Made in Brazil
giannini.com.br

Fonte: Própria do autor, 2023.

Nas informações contidas no produto não é especificado o diâmetro apenas do aço para as cordas, e sim o diâmetro contendo o revestimento externo, fazendo com que fosse necessária a medição do diâmetro interno da 3ª, 4ª, 5ª e 6ª corda com o auxílio de um micrômetro para investigação da relação do decaimento da força obtida no ensaio de tração.

A Figura 5.17 ilustra a medição de todas as cordas realizada com o auxílio do micrômetro.

Figura 5.17 – Especificação dos diâmetros das seis cordas de aço inoxidável



(a) 1ª Corda



(b) 2ª Corda



(c) 3ª Corda



(d) 4ª Corda



(e) 5ª Corda



(f) 6ª Corda

O diâmetro de cada uma das cordas mencionadas está especificado na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Diâmetro do fio de aço inoxidável

Corda	Diâmetro do aço inoxidável (mm)
1 ^a (Mi)	0,28
2 ^a (Si)	0,36
3 ^a (Sol)	0,30
4 ^a (Ré)	0,32
5 ^a (Lá)	0,35
6 ^a (Mi)	0,40

Fonte: Própria do autor, 2023.

Após a medição do miolo das cordas revestidas, foi constatado que o diâmetro do aço da 2^a para a 3^a corda é menor, e conseqüentemente a resistência é afetada fazendo com que houvesse um decréscimo da força, sendo que a 2^a corda, com diâmetro igual a 0,36 mm obteve uma força máxima igual a 215,65 N para o primeiro jogo e 207,02 N para o segundo jogo. Já a 3^a corda, com diâmetro igual 0,30 mm, obteve uma força máxima igual a 156,64 N para o primeiro jogo e 177,13 N para o segundo jogo. Dessa forma, é comprovado que o revestimento não obteve papel importante da resistência mecânica. A partir da 3^a corda, o diâmetro interno é aumentado para as cordas seguintes (4^a, 5^a e 6^a cordas), o que justifica o aumento da força a partir da corda mencionada, sendo que a 4^a corda obteve uma força máxima igual a 198,87 N no primeiro jogo e 210,00 N no segundo jogo, a 5^a corda, com força máxima no primeiro jogo igual a 231,44 N e 254,41 N no segundo jogo, e para a 6^a corda a força máxima encontrado foi de 300,07 N no primeiro jogo e 335,42 N no segundo jogo. Observou-se que a 6^a corda do conjunto é a mais resistente.

Tais informações refletem o fato de que o revestimento utilizado auxilia no aumento da densidade linear das cordas, no timbre e na frequência, não tendo uma relação direta com o limite de resistência dos componentes.

Os resultados apresentados e observados do ensaio de tração, análise microestrutural e análise dimensional refletem as características do aço especificado pelo fabricante Giannini (FAYSANO, 2023) sendo o aço inoxidável AISI 302. A liga apresenta composição semelhante ao aço inoxidável AISI 304, que é mais comum de ser encontrado no mercado que a liga AISI 302, porém com uma menor concentração de carbono. As composições de ambos podem ser observadas na Tabela 5.6 e Tabela 5.7.

Tabela 5.6 – Composição química do aço inoxidável AISI 302

Elemento	Concentração (%)
Carbono, C	0,12 (Max)
Manganês, Mn	2,00 (Max)
Silício, Si	1,00 (Max)
Chromium, Cr	17,00 (Max)
Níquel, Ni	8,00 (Max)

Fonte: Alloy wire international.

Tabela 5.7 – Composição química do aço inoxidável AISI 304

Elemento	Concentração (%)
Carbono, C	0,07 (Max)
Manganês, Mn	2,00 (Max)
Silício, Si	1,00 (Max)
Chromium, Cr	19,50 (Max)
Níquel, Ni	10,50 (Max)

Fonte: Alloy wire international.

Ao comparar as informações da Tabela 5.6 e Tabela 5.7, observou-se maior concentração de carbono na liga de aço inoxidável AISI 302, o que confere maior resistência à corrosão, além de dureza mais elevada em função do processo de trefilação, podendo haver maior fração de martensita induzida durante a deformação plástica na conformação. As características mencionadas são justificadas para aplicação de cordas de violão uma vez que a tensão e o desgaste exercidos são constantes no instrumento.

6 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos a partir da análise das curvas de força x deslocamento, relação da frequência e força após ensaio no monocórdio, imagens obtidas da microscopia eletrônica de varredura, análise microestrutural por meio do ensaio de metalografia e análise dimensional, foi possível realizar conclusões sobre a resistência das cordas, o comportamento após ruptura e a morfologia dos grãos do aço inoxidável AISI 302.

Os resultados obtidos da força máxima suportada pelas seis cordas, (Mi), (Si), (Sol), (Ré), (Lá) e (Mi), em conjunto com a relação da força adquirida no ensaio realizado com o monocórdio para cada frequência de afinação ideal das cordas (330 Hz – 1ª corda), (247 Hz – 2ª corda), (196 Hz – 3ª corda), (146 Hz – 4ª corda), (110 Hz – 5ª corda) e (82 Hz – 6ª corda) revelaram que a força máxima de resistência da corda é, no mínimo, 36% superior a força necessária para afinação das cordas. Assim, é possível concluir que a afinação das cordas não é responsável pelo rompimento. Dessa forma, a falha do material pode estar relacionada a fatores como desgaste nos pontos que estão constantemente em contato com o violão, atrito da palheta e dos dedos nas cordas ao serem tocadas, à oxidação referente ao suor dos dedos e o contato constante com a umidade e radiação e a falta de limpeza e cuidado com o instrumento.

A análise da seção transversal obtida pelas imagens do MEV após ruptura das cordas, juntamente com as curvas de força x deslocamento e composição química apresentada revelaram que o aço inoxidável AISI 302 possui um comportamento dúctil e é um material com elevada resistência à corrosão devido à concentração de carbono na estrutura.

Na metalografia foi possível observar uma microestrutura deformada devido ao processo de conformação para fabricação das cordas. Para uma melhor análise e conclusão mais específica acerca da microestrutura do aço, seria necessário um tratamento térmico de recozimento para melhor visualização dos grãos de austenita presentes.

Na análise dimensional das cordas de aço, conclui-se que a resistência da corda está diretamente ligada ao aço, sendo o revestimento utilizado para o aumento da densidade linear, conferindo tons mais graves e diminuição da frequência das últimas cordas.

Espera-se que a relação entre música e engenharia fique cada vez mais nítida para as pessoas que estão dentro e fora das áreas envolvidas, fazendo com que a evolução aconteça de forma crescente e abrangente.

7 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Para o desenvolvimento de trabalhos futuros, propõe-se:

- Analisar a corrosão das cordas (Mi), (Si), (Sol), (Ré), (Lá) e (Mi) após um certo período de uso e a influência na ruptura dos componentes;
- Analisar forma necessária para afinação das cordas após período de uso;
- Analisar a influência de outros materiais que compõe as cordas na força necessária para afinação;
- Determinar um método para análise de desgaste por meio de ensaio de fadiga para analisar ciclo de vida das cordas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFINKO. **MEV: Entenda o que faz a Microscopia Eletrônica de Varredura?** [S. l.], 2020. Disponível em: <https://afinkopolimeros.com.br/o-que-e-microscopia-eletronica-mev/>. Acesso em: 20 de abr. 2023.

ALLOY WIRE INTERNATIONAL. **Stainless Steel 302.** [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.alloywire.com.br/products/stainless-steel-302/>. Acesso em: 17 de nov. 2023.

ALLOY WIRE INTERNATIONAL. **Stainless Steel 304.** [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.alloywire.com.br/products/stainless-steel-304/>. Acesso em: 17 de nov. 2023.

CATELLI, F.; MUSSATO, G. **As frequências naturais de uma corda de instrumento musical a partir de seus parâmetros geométricos e físicos.** Revista Brasileira de Ensino de Física, [S. l.], v. 36, n. 2, p. 3-6, maio. 2014.

CATELLI, F.; MUSSATO, G. **Tensão, calibre e frequência das cordas de instrumentos.** Revista Brasileira de Ensino de Física, [S. l.], v. 36, n. 1, p. 3-7, fev. 2014.

CIMM. **Máquinas de Ensaio Universais.** [S. l.], 2023. Disponível em: https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6545-maquinas-de-ensaio-universais. Acesso em 20 de abr. 2023.

DAREZZO, D. **COMO SÃO FEITAS AS CORDAS PARA VIOLÃO?** [S. l.], 2019. Disponível em: <https://violaoparainiciantes.com/como-sao-feita-as-cordas-para-violao/>. Acesso em: 26 de maio. 2023.

FAYSANO, P. **Industrial.** Mensagem recebida por: <mkt@giannini.com.br> em 17 de nov. 2023.

Toginho Filho, D. O. **PRÁTICA DE LABORATÓRIO DE FÍSICA**, 2012, Londrina. **Ondas estacionárias em fio esticado.** Laboratório Integrado de Física Geral, Departamento de Física. Disponível em: http://www.uel.br/pessoal/renatoikeoka/pages/arquivos/Fisica%20Aplicada%20a%20Engenharia%20II/Ondas_estacionaria_em_fios_esticados.pdf. Acesso em: 20 de maio. 2023.

HENRIQUE, L. L. **Acústica musical.** 2. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbekian, 2007. 1130 p.

- INSTRUMENTARIA. Guia completo das melhores madeiras para tampos de violão: abeto, cedro e outras opções exóticas.** [S. l.], 2023. Disponível em: <https://instrumentaria.com.br/blog/16-guia-completo-das-melhores-madeiras-para-tampos-de-violao-abeto-cedro-e-outras-opcoes-exoticas>. Acesso em: 15 de abr. 2023.
- MONTEIRO, L. Conheça as partes que compõe o Violão.** [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.iniciantesdamusica.com.br/conheca-as-partes-que-compoe-o-violao>. Acesso em 15 de abr. 2023.
- MORAIS, G. CifraClub. Conheça os tipos de palheta disponíveis no mercado.** [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.cifraclub.com.br/blog/tipos-de-palheta/>. Acesso em: 20 de abr. 2023.
- Multisom. Cuidados com as cordas do violão.** [S. l.], 2018. Disponível em: <https://blog.multisom.com.br/cuidados-cordas-do-violao/>. Acesso em 20 de jun. 2023.
- MUSICOSMOS. História do Violão: aspectos acústicos, estruturais e históricos.** [S. l.], 2021. Disponível em: <https://musicosmos.com.br/historia-do-violao/>. Acesso em: 15 de abr. 2023.
- NAVEDA, L. Timbre e o Volume Sonoro do Violão: Uma Abordagem Acústica e Psicoacústica.** 2022. Dissertação (Mestre em Música) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.
- OLIVEIRA, D. Caracterização de Cordas de Guitarras Elétricas: Comportamento Mecânico, Corrosivo e Acústico Relacionados às Características Microestrutrais e Químicas.** 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
- OLVER, A.; WILSON, D.; CROFTON, S. Investigation of service failures of steel music wire.** 2006. Department of Mechanical Engineering, Imperial College, London, UK, 2006.
- PENN STAINLES PRODUCTS. 302 STAINLESS STEEL.** [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.pennstainless.com/resources/product-information/stainless-grades/300-series/302-stainless-steel/>. Acesso em 17 de nov. 2023.

REES, T. **Monochord**. Inglaterra: Universidade de Cambridge. 2009. Disponível em: <https://www.whipplemuseum.cam.ac.uk/explore-whipple-collections/acoustics/monochord>. Acesso em: 15 de set. 2023.

SCHMIDT, R. **Cordas para Violão de Aço – flat, round, bronze, phosphor bronze**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.encorda.com.br/blog/cordas-para-violao-de-aco-flat-round-bronze-phosphor-bronze-saiba-tudo/>. Acesso em 27 de mai. 2023.

SCHULZ, D. **Fontes sonoras: Cordas vibrantes e colunas de ar vibrantes**. 2008. Colégio Espírito Santo, Espírito Santo, 2008.

VICENTE, M. **Como escolher a palheta correta? Tudo sobre Palhetas!** [S. l.], 2018. Disponível em: <https://acordesecia.com.br/blog/como-escolher-a-palheta-certa-tudo-sobre-palhetas/>. Acesso em 28 de mai. 2023.

ZACZÉSKI, M.; BECKERT, C.; BARROS, T.; FERREIRA, A.; FREITAS, T. **Violão: aspectos acústicos, estruturais e históricos**. Revista Brasileira de Ensino de Física, [S. l.], v. 40, n. 1, p. 1-3, jul. 2017.

ZATKALÍKOVÁ, V.; MARKOVIOVÁ, L. **Corrosion resistance of electropolished AISI 304 stainless steel in dependence of temperature**. 2019. University of Žilina, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Material Engineering, Univerzitná. Slovakia, 2019.