

UNIVERSIDADE DO VALE DO PARAÍBA  
INSTITUTO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO  
PROGRAMA DE DOUTORADO EM FÍSICA E ASTRONOMIA

Camilo Andrés Velásquez Andrade

**Produção e caracterização de revestimentos de carbono amorfo hidrogenado em cordas metálicas para violão visando proteção contra corrosão em meio de suor sintético**

**Production and characterization of hydrogenated amorphous carbon coatings on metallic guitar strings to protect against corrosion in a synthetic sweat environment**

José dos Campos  
2023

Camilo Andrés Velásquez Andrade

**Produção e caracterização de revestimentos de carbono amorfo hidrogenado em cordas metálicas para violão visando proteção contra corrosão em meio de suor sintético**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia da Universidade do Vale do Paraíba, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Doutor em Física e Astronomia na área de atuação de Física Espacial e linha de pesquisa de Física da Ionosfera.

Orientador: Profa. Dra. Lúcia Vieira

São José dos Campos  
2023

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE DIVULGAÇÃO DA OBRA**  
**Ficha catalográfica**

**Andrade, Camilo Andres Velasquez**

Produção e caracterização de revestimentos de carbono amorfo hidrogenado em cordas metálicas para violão visando proteção contra corrosão em meio de suor sintético. / Camilo Andres Velasquez Andrade; orientadora, Lúcia Vieira. - São José dos Campos, SP, 2023.

1 CD-ROM, 102 p.

Tese (Doutorado) - Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos. Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia.

Inclui referências

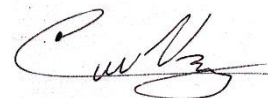
1. Física e Astronomia. 2. variação de massa; corrosão; suor artificial; aço niquelado; Raman; cordas de violão; DLC; PECVD. I. Vieira, Lúcia, orient. II. Universidade do Vale do Paraíba. Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia. III. Título.

Eu, Camilo Andres Velásquez Andrade, autor(a) da obra acima referenciada:

Autorizo a divulgação total ou parcial da obra impressa, digital ou fixada em outro tipo de mídia, bem como, a sua reprodução total ou parcial, devendo o usuário da reprodução atribuir os créditos ao autor da obra, citando a fonte.

Declaro, para todos os fins e efeitos de direito, que o Trabalho foi elaborado respeitando os princípios da moral e da ética e não violou qualquer direito de propriedade intelectual sob pena de responder civil, criminal, ética e profissionalmente por meus atos.

São José dos Campos, 22 de setembro de 2023.



---

Autor(a) da Obra

Data da defesa: 06/10/2023

**CAMILO ANDRES VELASQUEZ ANDRADE**

**“PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE REVESTIMENTOS DE CARBONO AMORFO HIDROGENADO EM CORDAS METÁLICAS PARA VIOLÃO VISANDO PROTEÇÃO CONTRA CORROSÃO EM MEIO DE SUOR SINTÉTICO.”**

Tese aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor, do Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, SP, pela seguinte banca examinadora:

Virginia K. de Oliveira	<i>Virginia K. de Oliveira</i>
Lucia Vieira	<i>Lucia Vieira</i>
Irapuan R. de O. Filho	<i>Irapuan Rodrigues</i>
Clodomiro A. Junior	<i>Clodomiro A. Junior</i>
João P. B. Machado	<i>João P. B. Machado</i>

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Lúcia Vieira

Diretora do IP&D – Univap

São José dos Campos, 06 de outubro de 2023.

*“La música siempre ha sido una de las compañeras de mi vida en todos los procesos, lo que he hecho siempre en mi vida siempre ha sido acompañado por la música. Asimismo, también el tener la música como hobby algunas veces intentar aprender a tocar, me ha dado ideas de cómo mejorar la calidad del sonido y el uso de las cuerdas de la guitarra, igual la música siempre me ha estado acompañando, por ella siempre mis días son felices o tristes, puedo hacer que todos los años de mi vida se encasillen en una play-list que siempre me va a acompañar.”*

## Agradecimentos

Primeiro quero agradecer à minha mãe e ao meu pai que me apoiaram nesta travessia, à minha irmã que sempre foi um apoio incondicional nos momentos bons e maus, aos meus amigos da Colômbia, principalmente Ivan Amortegui e Andrea Acero que estavam sempre atentos, à minha namorada Renata Aleixo por me apoiar, à professora Lúcia Vieira que sempre me deu as melhores orientações, aos membros da banca, à Angela e à Priscila pelas ajudas na central, ao Nilton, ao Ronaldo e ao Rodrigo que me apoiaram tanto para fazer alguns testes e ter resultados, a todos o grupo de apoio ao IP&D tanto na secretaria quanto nos outros espaços, na Capes-Cnpq pela bolsa de estudos, na Univap.

## RESUMO

As cordas de guitarra tendem a se corroer devido à exposição à umidade atmosférica e ao contato com elementos como o suor das mãos. Além disso, a presença de níquel nas cordas de metal pode causar alergias em pessoas sensíveis. Este estudo propõe a aplicação de um revestimento de carbono tipo diamante (DLC) em cordas metálicas de violão usando o método de deposição de vapor químico assistido por plasma. O objetivo foi investigar se esse revestimento poderia melhorar a durabilidade e a antialérgica das cordas de violão sem comprometer a qualidade do som. Para isso, foram utilizadas cordas de violão SG String (Extra Light - Nickel Wound - definidas pelo fabricante como: cordas cilíndricas de aço/estanho com núcleo hexagonal. Enrolamento com revestimento de aço/níquel - NPS.) com variações de espessura e formato. As cordas "E", "B" e "G" tinham um formato cilíndrico uniforme, enquanto as cordas "D", "A" e "E" tinham um núcleo de enrolamento hexagonal. As cordas revestidas e não revestidas foram submetidas a testes de exposição ao suor sintético e, posteriormente, analisadas por microscopia eletrônica de varredura com espectrometria de energia dispersiva (SEM/EDX), espectrometria de fluorescência de raios X (XRF) e espectrometria de emissão óptica com plasma induzido por acoplamento (ICP-OES). O revestimento de DLC foi aplicado a segmentos de cordas para análise posterior, bem como a cordas completas, com testes de som realizados em um violão eletroacústico Tagima walnut-two folk series. Fragmentos e conjuntos completos de cordas, com e sem revestimento, foram submetidos à análise de espectroscopia Raman após a aplicação do DLC, confirmando a presença do revestimento de carbono amorfo hidrogenado. Após a imersão em suor sintético por 240 horas, observou-se que as variações de massa entre as cordas revestidas e não revestidas não foram significativas, sugerindo que as cordas revestidas têm durabilidade de corrosão semelhante às cordas não revestidas. Os testes de som revelaram que, em termos de timbre, as cordas revestidas se comportaram de forma semelhante às cordas não revestidas, com uma leve diferença de timbre devido ao aumento de uma oitava nas frequências das cordas revestidas, o que, no entanto, não afetou significativamente a qualidade final do som percebida pelos músicos, pois o som resultante é uma combinação das frequências naturais e secundárias das cordas.

**Palavras-chave:** Variação de massa; corrosão; suor artificial; aço niquelado; Raman; cordas de violão; DLC; PECVD

## ABSTRACT

Guitar strings tend to corrode due to exposure to atmospheric humidity and contact with elements such as hand sweat. In addition, the presence of nickel in metal strings can cause allergies in sensitive people. This study proposes applying a diamond-like carbon (DLC) coating to metal guitar strings using the plasma-assisted chemical vapor deposition method. The aim was to investigate whether this coating could improve the durability and anti-allergy properties of guitar strings without compromising sound quality. For this purpose, SG String guitar strings were used (Extra Light - Nickel Wound - defined by the manufacturer as: cylindrical steel/tin strings with a hexagonal core. Winding with steel/nickel coating (NPS).) with variations in thickness and shape. The "E", "B" and "G" strings had a uniform cylindrical shape, while the "D", "A" and "E" strings had a hexagonal winding core. The coated and uncoated ropes were subjected to synthetic sweat exposure tests and subsequently analyzed using scanning electron microscopy with energy dispersive spectrometry (SEM/EDX), X-ray fluorescence spectrometry (XRF) and coupling-induced plasma optical emission spectrometry (ICP-OES). The DLC coating was applied to string segments for further analysis, as well as to complete strings, with sound tests carried out on a Tagima walnut-two folk series electroacoustic guitar. Fragments and complete sets of strings, with and without coating, were subjected to Raman spectroscopy analysis after application of the DLC, confirming the presence of the hydrogenated amorphous carbon coating. After immersion in synthetic sweat for 240 hours, it was observed that the mass variations between the coated and uncoated strings were not significant, suggesting that the coated strings have similar corrosion durability to the uncoated strings. The sound tests revealed that, in terms of timbre, the coated strings behaved similarly to the uncoated strings, with a slight difference in timbre due to the one-octave increase in the frequencies of the coated strings, which, however, did not significantly affect the final quality of the sound perceived by the musicians, as the resulting sound is a combination of the natural and secondary frequencies of the strings.

**Keywords:** Mass variation; corrosion; artificial sweat; nickel-plated steel; Raman; guitar strings; DLC; PECVD

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de fase ternária para carbonos hidrogenados amorfos.....	23
Figura 2. PECVD RF para deposição de carbono tipo diamante. ....	26
Figura 3. Temperatura do elétron $T_e$ e a probabilidade de dissociação/ionização de uma espécie. ....	28
Figura 4. Onda senoidal onde o período e a amplitude da onda são apresentados.....	31
Figura 5. Oscilador Amortecido.....	35
Figura 6. É mostrada uma parte, de comprimento $ds$ , de uma corda fixada em ambas as extremidades. O deslocamento do equilíbrio é $q$ à esquerda e $q + dq$ à direita. As tensões $\tau$ em cada extremidade são iguais em magnitude, mas não em direção. Somente ondas transversais são consideradas. ....	36
Figura 7. Modos normais de uma corda vibrante para: (a) $n = 1$ ; (b) $n = 2$ ; (c) $n = 3$ . Note que a onda estacionária possui $n - 1$ nós .....	38
Figura 8. O gráfico mostra dois sinais, um azul e outro vermelho, que têm frequências próximas e o gráfico preto representa a soma dos sinais. ....	39
Figura 9. Da esquerda para a direita, Violão mourisca, Violão latina, vihuela e alaúde.....	42
Figura 10. Violão espanhol ou clássico.....	46
Figura 11. Violão flamenco.....	47
Figura 12. Violão russo .....	47
Figura 13. Violão acústico .....	48
Figura 14. Violão eletroacústico .....	49
Figura 15. Violão elétrico.....	49
Figura 16. Foto esquemática do violão Tagima usado para a gravação .....	50
Figura 17. Imagem de um ponto de vista transversal. (Esta parte refere-se apenas a Violão elétrica e acústica).....	54
Figura 18. Diferentes enrolados que tem as cordas.....	56
Figura 19. Imagem de relato de alergia de contato por Níquel em regiões mais comuns são abdômen(a), Pescoço (b), dedos(c), pulso(d) e mão (e).....	61
Figura 20. Cordas de violão e seus diferentes formatos e calibres, a) o calibre de cada uma é apresentado. b) as cordas completas são apresentadas. 1ª (e), 2ª (B), 3ª (G), 4ª (D), 5ª (A), 6ª (E).....	63
Figura 21. Microscópio eletrônico de varredura – MEV. ....	67
Figura 22. Espectroscopia de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) modelo Optima 7300 DV da Perkin Elme .....	68
Figura 23. Espectrômetro Raman Horiba modelo LabRam HR Evolution.....	70
Figura 24. Espectrofotômetro XRF Panalytical modelo Epsilon 3.....	72
Figura 25. Reator PECVD para depósito de DLC.....	76

Figura 26. Inclui uma fotografia da corda sem (a) e com (b) revestimento de filme de DLC-H. Pode-se observar que a coloração do revestimento torna a corda mais escura. ....	76
Figura 27. Corda “e” sem revestimento contém fotomicrografia (a) e espectro por análise EDX (b)..	78
Figura 28. Corda “B” sem revestimento contém fotomicrografia (a) e espectro por análise EDX (b).	79
Figura 29. Corda “D” sem revestimento contém fotomicrografia (a) e espectro por análise EDX (b).	80
Figura 30. Fotomicrográficas obtida via MEV da corda “D” vista na frente Fotomicrografia (a), análise de EDX do núcleo (b) e análise de EDX da bobina (c).....	81
Figura 31. Corda 3 alongada .....	83
Figura 32. Componentes químicos de cordas analisados por espectroscopia de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) - Diluição 1/100 mg/L.....	85
Figura 33. Espectro Raman do revestimento de DLC com menor valor de ID/IG .....	86
Figura 34. Espectro Raman do revestimento de DLC com maior valor de ID/IG .....	87
Figura 35. Componentes químicos de cordas analisados por espectroscopia de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) - Diluição 1/100 mg/L. Valores em porcentagem dos elementos.....	88
Figura 36. Variação das massas das amostras das cordas “e” sem e com revestimento. ....	90
Figura 37. Variação das massas das amostras das cordas “B” sem e com revestimento. ....	91
Figura 38. Variação das massas das amostras das cordas “G” sem e com revestimento. ....	92
Figura 39. Variação das massas das amostras das cordas “D” sem e com revestimento. ....	93
Figura 40. Variação das massas das amostras das cordas “A” sem e com revestimento. ....	94
Figura 41. Variação das massas das amostras das cordas “E” sem e com revestimento.....	95
Figura 42. Variação das massas das amostras das cordas com e sem revestimento.....	95
Figura 43. A figura apresenta duas fotomicrografias de SEM com ampliação de 87x, onde temos (a) corda "E" revestida e (b) corda "E" não revestida.....	97
Figura 44. Na figura, temos dados de frequência para o acorde "G" nas cordas sem revestimento (a) e com revestimento (b).....	99
Figura 45. Na figura, temos dados de frequência para a corda "e" nas cordas sem revestimento (a) e com revestimento (b). ....	101
Figura 46. Na figura, temos dados de frequência para a corda "B" nas cordas sem revestimento (a) e com revestimento (b). ....	103
Figura 47. Na figura, temos dados de frequência para a corda "G" nas cordas sem revestimento (a) e com revestimento (b).....	104
Figura 48. Na figura, temos dados de frequência para a corda "D" nas cordas sem revestimento (a) e com revestimento (b).....	105
Figura 49. Na figura, temos dados de frequência para a corda "A" nas cordas sem revestimento (a) e com revestimento (b).....	107

Figura 50. Na figura, temos dados de frequência para a corda "E" nas cordas sem revestimento (a) e com revestimento (b). ..... 109

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Relação da linguagem musical com a linguagem física.....	51
Tabela 2: Descrição do calibre das cordas de violão, medido em polegadas (in). .....	52
Tabela 3: Diferenças entre os dois núcleos em termos de desempenho.....	55
Tabela 4: as diferenças entre a Enrolado redondo e plana em termos de desempenho. ....	56
Tabela 5. Tabela de frequências por oitava.....	59
Tabela 6. frequências fundamentais para as cordas do violão quando são tocadas no ar .....	60
Tabela 7. Parâmetros de deposição .....	75
Tabela 8. Resultados da composição química, peso e porcentagem atômica dos elementos presentes na corda “e” análise EDX. ....	78
Tabela 9. Resultados da composição atômica da corda “B” em relação à análise EDX.....	79
Tabela 10. Resultados da composição atômica da corda “D” em relação à análise EDX.....	80
Tabela 11. Resultados de EDX da corda visto na frente, onde (a) são os valores respectivos do núcleo e (b) do enrolamento. ....	81
Tabela 12. Resultados de EDX da corda alongada, onde (a) são os valores respectivos do enrolamento e (b) os valores sobre o corte do núcleo. ....	83
Tabela 13. Relação do espectro Raman com os respectivos valores de intensidade, valor de pico, FWHM e ID/IG da Figura 33 .....	87
Tabela 14. Relação do espectro Raman com os respectivos valores de intensidade, valor de pico, FWHM e ID/IG da Figura 34 .....	88
Tabela 15. Dados de perda de massa para cada corda com e sem revestimento. ....	96
Tabela 16. Variação das notas individuais do acorde "G" de acordo com a tabela 6 em comparação com as notas individuais do acorde sem revestimento e com revestimento DLC. ....	98
Tabela 17. Variação da tonalidade (frequências, fundamental e secundária) da corda "e" em relação à apresentada na tabela 6.....	100
Tabela 18. Variação da tonalidade (frequências, fundamental e secundária) da corda "B" em relação à apresentada na Tabela 6. ....	102
Tabela 19. Variação da tonalidade (frequências, fundamental e secundária) da corda "G" em relação à apresentada na tabela 6.....	103
Tabela 20. Variação da tonalidade (frequências, fundamental e secundária) da corda "D" em relação à apresentada na tabela 6.....	105
Tabela 21. Variação da tonalidade (frequências, fundamental e secundária) da corda "A" em relação à apresentada na Tabela 6. ....	107
Tabela 22. Variação da tonalidade (frequências, fundamental e secundária) da corda "E" em relação à apresentada na tabela 6.....	108

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>REVISAO DA LITERATURA.....</b>	<b>15</b>
1.1	TIPOS DE FABRICAÇÃO OU REVESTIMENTOS DE CORDAS DE VIOLÃO.....	15
1.1.1	Fabricação ou revestimentos de cordas de metal.....	15
1.1.2	Revestimentos de polímeros.....	18
1.2	REVESTIMENTO DE CARBONO TIPO DIAMANTE (DIAMOND-LIKE CARBON)...	22
1.2.1	Tipos de revestimentos de carbono amorfo.....	22
1.2.2	Espectroscopia Raman para encontrar parâmetros básicos de carbono amorfo hidrogenado	24
<b>1.3</b>	<b>DEPOSICAO QUIMICA NA FASE VAPOR ASSISTIDA POR PLASMA.....</b>	<b>25</b>
<b>1.4</b>	<b>FORÇA APLICADA SOBRE UMA CORDA TENSIONADA.....</b>	<b>30</b>
1.4.1	Vibrações senoidais.....	32
1.4.2	Oscilador Amortecido.....	33
1.4.3	Noções de física ondulatória (ondas em uma corda).....	35
1.4.4	Equação da onda e ondas estacionárias.....	37
<b>1.5</b>	<b>VIOLÃO.....</b>	<b>40</b>
1.5.5	História.....	40
1.5.6	Tipos de violão.....	46
1.5.6.1	Violão espanhol ou clássico.....	46
1.5.6.2	Violão flamenco.....	47
1.5.6.3	Violão russo.....	47
1.5.6.4	Violão acústico.....	48
1.5.6.5	Violão eletroacústico.....	49
1.5.6.6	Violão elétrico.....	49
1.5.7	Violão.....	50
1.5.8	Cordas de violão.....	51
1.5.8.1	Associação da linguagem musical à linguagem física.....	51
1.5.8.2	Calibre.....	51
1.5.8.3	Metal.....	53
1.5.8.4	Núcleo das cordas.....	54
1.5.8.5	Enrolamento.....	55
1.5.8.6	Revestimento.....	57
1.5.9	Origem do som.....	57
1.5.9.1	Parâmetros de som.....	58
1.5.9.2	Espectro audível e audiodfrequências.....	58
<b>1.6</b>	<b>ALERGIAS POR NÍQUEL.....</b>	<b>60</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO GERAL.....</b>	<b>62</b>
<b>2.1</b>	<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>62</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>63</b>
<b>3.1</b>	<b>MATERIAIS.....</b>	<b>63</b>
3.1.1	Cordas de Violão.....	63
3.1.2	Produtos químicos e reagentes utilizados no processo de deposição dos revestimentos.....	64
3.1.2.1	Preparação do suor sintético.....	64
<b>3.2</b>	<b>MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO.....</b>	<b>65</b>
3.2.3	Caracterização das cordas sem e com revestimento.....	65
3.2.4	Técnicas de caracterização.....	66
3.2.4.1	Morfologia e estequiometria química.....	66
3.2.4.2	Espectroscopia de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES).....	68
3.2.4.3	Espectroscopia Raman.....	69
3.2.4.4	Fluorescência de raios X (XRF).....	70
3.2.4.5	Corrosão.....	72
3.2.4.6	Análise do espectro sonoro.....	74

3.2.5	Deposição de DLC usando PECVD .....	74
3.2.5.1	Preparação de amostra para deposição de DLC.....	74
3.2.5.2	Deposição de DLC-H nas cordas da Violão .....	75
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>77</b>
<b>4.1</b>	<b>MORFOLOGIA E ESTEQUIOMETRIA.....</b>	<b>77</b>
4.1.1	Corda “e” .....	77
4.1.2	Corda “B” .....	78
4.1.3	Corda “D” .....	79
4.1.4	Corda “D” Vista na frente.....	80
4.1.5	Corda “D” alongada.....	82
4.2	ESPECTROSCOPIA DE EMISSÃO ÓPTICA COM PLASMA INDUTIVAMENTE ACOPLADO (ICP-OES).....	84
4.3	ESPECTROSCOPIA RAMAN .....	86
4.4	FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (XRF) .....	88
4.5	VARIAÇÃO DA MASSA DE CORDAS REVESTIDAS E NÃO REVESTIDAS COM RELAÇÃO AO TEMPO PELA IMERSÃO DAS CORDAS EM SUOR SINTÉTICO .....	89
4.5.6	Corda “e” .....	89
4.5.7	Corda “B” .....	90
4.5.8	Corda “G” .....	91
4.5.9	Corda “D” .....	92
4.5.10	Corda “A” .....	93
4.5.11	Corda “E”.....	94
4.5.12	Comparação da corrosão da corda “E” com revestimento e sem Revestimento a partir da MEV .....	96
<b>4.6</b>	<b>VARIAÇÃO DA TONALIDADE E DO TIMBRE DAS CORDAS COM E SEM REVESTIMENTO.....</b>	<b>97</b>
4.6.1	Variação do timbre e tonalidade do acorde “G” em cordas som e sem revestimento .....	97
4.6.2	Corda “e” .....	99
4.6.3	Corda “B” .....	101
4.6.4	Corda “G” .....	103
4.6.5	Corda “D” .....	104
4.6.6	Corda “A” .....	106
4.6.7	Corda “E”.....	108
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>110</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>111</b>

## **1 REVISAO DA LITERATURA**

### **1.1 TIPOS DE FABRICAÇÃO OU REVESTIMENTOS DE CORDAS DE VIOLÃO**

Desde o início do violão, a sonoridade tem sido de fundamental importância, o que se deve à criação e à evolução das cordas. A partir dos tempos modernos, as empresas fabricantes de cordas evoluíram para agregar melhores condições ao som, enrolando e revestindo as cordas (Edward, 1941).

Dessa forma, algumas formas de produção e revestimento de cordas metálicas podem ser observadas, desde a produção de ligas de diferentes metais (Parker; Rohrbacher, 2002) até revestimentos poliméricos (D'Addario, 2006). Nas seções a seguir, apresentaremos algumas formas de produzir ou revestir ligas metálicas e revestimentos de polímeros em cordas para obter melhores tonalidades e durabilidade.

#### **1.1.1 Fabricação ou revestimentos de cordas de metal**

Para a era moderna, a partir da criação das guitarras elétricas e eletroacústicas, as cordas passaram a ser produzidas de diferentes formas, devido ao fato de que os captadores piezoelétricos tinham condições diferentes para adquirir vibrações mecânicas e transformá-las em sinais elétricos, para a criação das primeiras cordas metálicas, foram criadas máquinas para tornar o processo de fabricação mais industrializado (Edward, 1941).

Entre a produção, a liga e os revestimentos metálicos, existem diferentes métodos para as cordas de violão, entre os quais está o da corda nº 4, nº 5 e nº 6 seja, em que temos um núcleo e um enrolamento na parte superior que cobre esse núcleo, deve-se levar em conta que os materiais dos dois tipos de fio são indiferentes, porém sugere-se que o fio de cobertura tenha um coeficiente de expansão térmica linear maior do que o fio do núcleo. Quando esse processo é realizado à temperatura ambiente, a corda é submetida a um tratamento térmico em que fica imerso em uma temperatura elevada por um período considerável. A temperatura e a duração desse processo são adaptadas ao material do fio enrolado para aliviar as tensões residuais desenvolvidas durante o processo de enrolamento. No caso de fios com bainha feitos de latão, bronze ou cobre, a temperatura de condicionamento pode variar entre 270°F e 480°F, com

tempos de imersão proporcionais, a fim de reduzir a tendência dos fios enrolados de se desenrolarem com o tempo (Stone; Falcone, 1977).

No caso de algumas cordas fabricadas com núcleo de tripa animal e aço, no caso da tripa natural, ela pode ser derivada de várias fontes, como a tripa de ovelha, que é seca e entrelaçada. Por outro lado, o núcleo de aço inclui variedades como aço carbono e aço cromo-níquel. Na corda nº 4, nº 5 e nº 6 seja, eles são caracterizados por terem um revestimento composto de pelo menos um revestimento externo e, em alguns casos, um revestimento intermediário adicional entre o núcleo e o primeiro revestimento. Foi demonstrado que o uso de diferentes metais e ligas nesses revestimentos influencia positivamente as propriedades acústicas das cordas. O arranjo de várias camadas intermediárias também aumenta a massa da corda e melhora suas propriedades sonoras, o comportamento de resposta, a estabilidade de longo prazo e as propriedades alergênicas são melhoradas quando o revestimento inclui um metal selecionado do grupo de estanho, ouro, alumínio, titânio, molibdênio, tungstênio, liga de tungstênio, paládio, ródio ou outro metal ou liga metálica, evitando assim alergias, melhorando o som e evitando o desgaste por corrosão (D'Addario, 2017; Jolk *et al.*, 2015; Klanner, 2005).

Outra maneira de evitar a corrosão nas cordas é o uso de aços inoxidáveis duplex na fabricação de cordas. Os aços inoxidáveis duplex (composições adequadas de aços inoxidáveis duplex geralmente contêm (1) 19-28% de cromo e 4-10% de níquel, (2) com preferência para 21-26% de cromo e 4-8% de níquel) são compostos de duas fases separadas: uma fase austenítica e uma fase ferrítica, geralmente em uma proporção de 30-70% de cada. Enquanto a fase ferrítica é magnética, a fase austenítica não é. Isso confere às cordas propriedades magnéticas. Isso confere às cordas propriedades magnéticas, o que pode ser benéfico para instrumentos como guitarras elétricas. Além disso, durante a produção de cordas, a fase austenítica do aço é parcialmente transformada em martensita, o que aumenta sua magnetização (Vosough; Söderman, 2010).

Por fim, as cordas podem ser fabricadas com uma variedade de ligas de aço inoxidável com uma composição química específica. Os elementos e as faixas de porcentagem de peso que compõem essa liga são os seguintes: Carbono (C), Nitrogênio (N), Silício (Si), Manganês (Mn), Níquel (Ni), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Molibdênio (Mo), Tungstênio (W), Vanádio (V), Titânio (Ti), Alumínio (Al), Nióbio (Nb), Cobalto (Co). Dependendo da liga, as condições das cordas variam em suas propriedades mecânicas, sonoras e de durabilidade. A função de cada elemento na liga é explicada a seguir:

- Carbono (C): aumenta a resistência e a dureza da fase martensítica, mas, em excesso, diminui a ductilidade e a resistência à corrosão. Ele permanece entre 0,01% e 0,04%.

- Nitrogênio (N): aumenta a resistência à corrosão e a resistência mecânica. Entretanto, o excesso de nitrogênio pode afetar negativamente a ductilidade. É mantido entre 0,01% e 0,06%.

- Silício (Si): usado para remover o oxigênio durante a fabricação e promover a formação da fase ferrítica. É mantido entre 0,1% e 1,0%.

- Manganês (Mn): Estabiliza a fase austenítica e controla a quantidade de enxofre no aço. É mantido entre 0,2% e 2,0%.

- Níquel (Ni): Aumenta a resistência à corrosão e melhora a ductilidade. É mantido entre 5,0% e 10%.

- Cromo (Cr): contribui para a resistência à corrosão e afeta a formação da fase martensítica. É mantido entre 16% e 20%.

- Cobre (Cu): aumenta a ductilidade e estabiliza a fase austenítica. Mantém-se entre 0,2% e 3,0%.

- Molibdênio (Mo): melhora a resistência à corrosão, mas, em excesso, estabiliza a fase ferrítica. Permanece entre 0% e 2,0%.

- Tungstênio (W) e Vanádio (V): estabilizam a fase ferrítica e têm afinidade com determinados elementos. São mantidos em faixas baixas.

- Titânio (Ti): estabiliza a fase ferrítica delta e reduz a formação de carbonetos e nitretos. É mantido entre 0% e 1,0%.

- Alumínio (Al): usado durante a fusão e estabiliza a fase ferrítica. É mantido entre 0% e 1,0%.

- Nióbio (Nb): Estabiliza a fase ferrítica e reduz a formação de carbonetos e nitretos. Mantém-se entre 0% e 1,0%.

- Cobalto (Co): tem propriedades intermediárias entre o ferro e o níquel, mas deve ser limitado a 1,0% devido ao custo.

As cordas feitas com essa liga de aço apresentam excelente resistência à corrosão, ductilidade, resistência mecânica e propriedades magnéticas, o que as torna ideais para uso em instrumentos musicais. As cordas musicais podem ser fios individuais ou cordas enroladas e

são usadas em uma variedade de instrumentos musicais, inclusive instrumentos elétricos e acústicos, como violões, violinos e pianos (Soderman; Nylof, 2012).

### **1.1.2 Revestimentos de polímeros**

Para cordas revestidas com polímero, geralmente são realizados procedimentos de liga ou revestimentos metálicos, conforme apresentado no parágrafo anterior, após os quais são realizados diferentes procedimentos de acordo com as condições, necessidades ou tipo de polímero.

Um método de fabricação de cordas revestidas para instrumentos musicais é um processo composto de niquelagem sem eletrólito, que envolve a deposição de uma camada uniforme de níquel, politetrafluoroetileno (PTFE) ultrafino e, em alguns casos, partículas de diamante ultrafinas nas cordas. Esses revestimentos melhoram várias propriedades das cordas, como resistência ao desgaste, atrito, durabilidade e características magnéticas, dependendo da formulação utilizada.

O processo é dividido em várias etapas, que são detalhadas a seguir:

#### **Etapa 1: Pré-tratamento**

Antes da deposição, os itens, que neste caso são cordas de instrumentos musicais, passam por um pré-tratamento, que pode incluir limpeza e outros tratamentos para preparar a superfície das cordas.

#### **Etapa 2: Niquelagem eletrolítica composta**

As cordas são imersas em um banho composto de niquelagem sem eletrólito por um tempo especificado para criar uma camada uniforme de níquel. A formulação do banho inclui PTFE ultrafino, níquel e/ou cobalto. Esse revestimento melhora a lubrificação do cabo, reduz o atrito e oferece resistência à corrosão. Além disso, o cobalto melhora as propriedades magnéticas dos cabos.

#### **Etapa 3: Tratamento térmico**

Os cabos revestidos são tratados termicamente a uma temperatura de aproximadamente 250 graus Celsius por cerca de uma hora. Isso proporciona vários benefícios,

como melhor adesão do revestimento, coesão da matriz e das partículas, endurecimento da superfície por precipitação e ligação eficaz entre o fio central e o fio de enrolamento.

#### Etapa 4: Polimento

Os fios revestidos são então polidos para remover qualquer resíduo de PTFE ou de diamante ultrafino (Everly, 2009; Jones, 2014; Lazarus, 1985).

Para outros cabos revestidos com polímeros, como fluoro polímeros, politetrafluoroetileno (PTFE), etileno-propileno fluorado (FEP), polietileno, resina perfluoroalcoxi (PFA), poliuretano, polipropileno e poliéster, entre outros. O politetrafluoroetileno expandido poroso (ePTFE) é um material particularmente preferido devido à sua deformabilidade e resistência ao desgaste. Nesse caso, as resinas preferenciais de baixa temperatura usadas para esta invenção incluem resinas termoplásticas que têm uma taxa de fluxo de fusão (MFR) superior a aproximadamente 1 grama/10 minutos sob determinadas condições de temperatura. As resinas termofixas que podem ser curadas em baixas temperaturas também são preferidas, e as resinas curáveis por luz UV são particularmente preferidas. A bainha de polímero da presente invenção serve para vedar o cabo e protegê-lo de contaminação durante o manuseio. Além disso, ao usar uma bainha de polímero poroso, o preenchimento de pelo menos parte da porosidade com resina pode alterar as propriedades da bainha, inclusive sua massa e resistência ao desgaste.

A invenção se aplica principalmente a cordas de violão e garante que pelo menos uma parte da corda seja coberta, especialmente na região do braço. Entretanto, também é possível cobrir todo o comprimento da corda. A cobertura de polímero deve ser deformável para permitir o movimento dos enrolamentos da corda durante a execução sem comprometer a qualidade tonal da corda (Allen *et al.*, 2018; Hebestreit; Myers, 2007).

Outro processo de fabricação de uma corda de instrumento musical de tripa com fio enrolado envolve o enrolamento de um núcleo de tripa com fio de metal e, em seguida, a imersão da corda enrolada em uma solução de verniz quente, penetrando nos espaços entre as voltas do enrolamento do fio e preenchendo os espaços entre o núcleo de tripa e o fio, e entre as sucessivas voltas do fio com a referida solução de verniz, removendo o excesso de solução de verniz da superfície externa do fio enrolado e secando a referida corda por tempo suficiente para secar o verniz localizado nesses espaços. A solução de verniz consiste em uma solução alcoólica de verniz para instrumentos, e o cabo é encharcado por aproximadamente doze horas e seco por aproximadamente quatro semanas (Ralls, 1959).

Outro processo de revestimento envolve a criação de um núcleo ou enchimento usando vários filamentos termoplásticos, que podem ser de náilon, poliéster, fibra de vidro ou fibras de aramida. Esses filamentos podem ser trançados juntos para formar o núcleo. O núcleo pode ser feito de náilon, poliéster, como DACRON (marca registrada da duPont), fibra de vidro ou fibras de aramida, como KEVLAR ou NOMEX (ambas marcas registradas da duPont). Após a criação, são usados agentes como: METHACROL LUBRICANT K (marca registrada da duPont), que é uma emulsão catiônica à base de óleo e, especificamente, é um produto do tipo óleo mineral que é emulsionado em água, especificamente, uma dispersão aquosa de 30%. Outro agente lubrificante catiônico que se mostrou eficaz é o ZELEC DP (marca registrada da duPont), que é uma dispersão de um polímero catiônico parcialmente neutralizado por um surfactante aniônico com características antiestáticas. Outro agente lubrificante catiônico que é eficaz na execução da presente invenção é o AVITEX NA (marca registrada da duPont), que é um éster de alquilamina quaternizado usado na criação *in situ* do núcleo ou aplicado posteriormente como um revestimento (Crandall; Crandall, 1977).

Entre outros revestimentos, há também revestimentos que auxiliam a adesão entre os núcleos das cordas nº 4, nº 5 e nº 6 e seus enrolamentos, tendo em vista que esses enrolamentos podem se soltar, portanto, um revestimento é usado no núcleo para proporcionar melhor adesão, evitando assim que a corrosão atinja o fio do núcleo, além de atuar como isolante elétrico para evitar a atividade galvânica entre o fio do núcleo e o fio do enrolamento. Essencialmente, é criada uma camada isolante firmemente ligada entre o fio do núcleo e o fio do envoltório. O fio central é recozido e imerso em um material de revestimento aderente, seguido de secagem. Em alguns casos, o fio de enrolamento é mergulhado em um material não aderente. O fio central revestido é então enrolado com o fio de enrolamento. O cabo é processado posteriormente para derreter o revestimento aderente, sem afetar o revestimento não aderente no fio de enrolamento. Vários tipos de revestimentos aderentes adequados são identificados, incluindo soluções de polivinil butiral ("PVB"), epóxi, poliéster, poliamida e cresol. Esses revestimentos são selecionados devido à sua flexibilidade, durabilidade, capacidade de refluxo e custo-benefício. Os solventes e as temperaturas de refluxo variam de acordo com o tipo de material de revestimento usado. Em geral, esse método garante uma forte ligação entre o núcleo e os fios do envoltório, evitando a corrosão e a degradação do cabo devido à exposição a contaminantes ambientais ou humanos (Jones, 2016).

Por fim, é descrita uma técnica inovadora de tratamento de superfície com vapor de politetrafluoroetileno (PTFE) aplicada a cordas de instrumentos musicais. É apresentado um

processo que usa uma câmara de vácuo para criar uma fase de vapor de PTFE, que é então condensada nas cordas, gerando vantagens significativas em comparação com outras tecnologias de revestimento.

Os processos de vapor usados incluem a deposição de plasma por pulverização catódica e outros métodos. O procedimento é detalhado em seis estágios:

1. Limpeza das peças: as cordas são limpas para remover contaminantes, usando limpeza ultrassônica em detergentes e acetona. Opcionalmente, elas podem ser tratadas em uma câmara de vácuo com energia de radiofrequência para melhorar a aderência do tratamento.

2. Redução da pressão: a pressão no recipiente é reduzida a níveis de vácuo usando bombas mecânicas e criogênicas, removendo qualquer contaminação residual.

3. Introdução do gás de processo: um gás, como argônio ou nitrogênio, é introduzido para criar um ambiente de vácuo e permitir a deposição de PTFE.

4. Deposição por pulverização catódica por RF: a energia de radiofrequência é aplicada a um conjunto de cátodo com uma folha de PTFE, criando um plasma que produz vapor de PTFE no recipiente a vácuo. A energia é mantida até que a espessura desejada seja alcançada.

5. Métodos alternativos: Diferentes métodos, como sputtering de feixe de íons, deposição a laser ou fluxo de gás precursor, podem ser usados para formar a fase de vapor de PTFE.

6. Criação de uma fase de vapor e nucleação: Em todos os métodos, uma fase de vapor de polímero é formada, condensada e nucleada na superfície da corda do instrumento musical.

Deve-se observar que outros polímeros além do PTFE podem ser aplicados e o processo é modificado para controlar a porosidade dos materiais nucleados (Schlesinger, 2004).

Por fim, depois de mostrar as maneiras de criar revestimentos em ligas metálicas e ligas poliméricas, nosso trabalho se concentra principalmente no revestimento de cabos metálicos por meio de revestimento de carbono tipo diamante hidrogenado, conforme será apresentado nas seções a seguir.

## 1.2 REVESTIMENTO DE CARBONO TIPO DIAMANTE (DIAMOND-LIKE CARBON)

Os revestimentos de carbono tipo diamante são camadas superficiais de carbono amorfo que possuem algumas propriedades tipo diamante, estas são caracterizadas com base no número de relações de ligações de carbono tipo  $sp^2$ ,  $sp^3$  e a estrutura, tendo como importância as ligações que não contêm hidrogênio (carbono tipo grafite [GLC] e carbono amorfo [a-C]) até carbono tetraédrico (ta-C) (Moriguchi *et al.*, 2016). Alguns dos principais precursores de carbono usados para fazer revestimentos DLC são: etano ( $C_2H_6$ ), metano ( $CH_4$ ), acetileno ( $C_2H_2$ ), isobutano ( $C_4H_{10}$ ), propano ( $C_3H_8$ ), benzeno ( $C_6H_6$ ) e n-butano ( $C_4H_{10}$ ) (Zahid *et al.*, 2015).

Na próxima seção, serão apresentadas as informações relevantes sobre os revestimentos de carbono amorfo hidrogenado e suas implicações.

### 1.2.1 Tipos de revestimentos de carbono amorfo

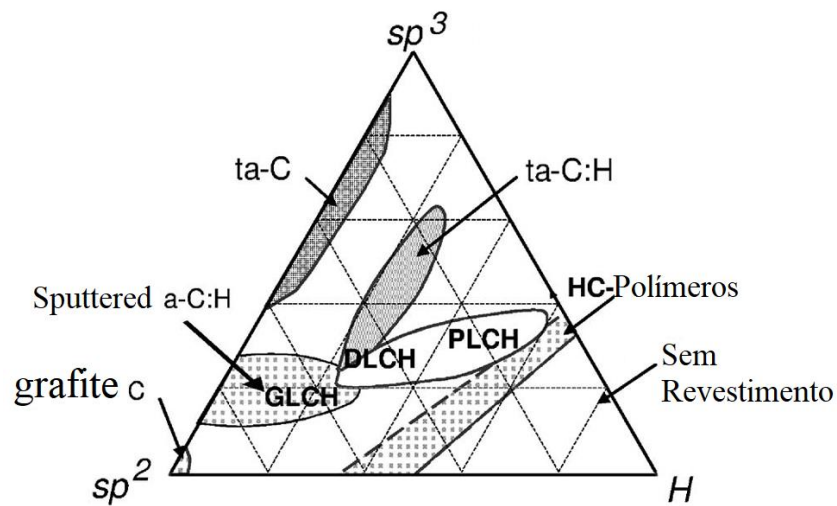
Os revestimentos de carbono amorfo hidrogenado exibem diversas configurações de átomos de carbono, dependendo das ligações que eles formam. Essas configurações atômicas variam de acordo com a fração de carbono e a quantidade de hidrogênio (H) presente no revestimento. Este artigo apresenta quatro tipos principais de revestimentos de carbono amorfo hidrogenado, destacando suas diferenças (Casiraghi; Ferrari; Robertson, 2005).

1. **Revestimento Polímero de Carbono Amorfo Hidrogenado (PLCH):** Este tipo de revestimento apresenta um alto teor de hidrogênio, geralmente entre 40% e 60%. Cerca de 70% das ligações neste revestimento são do tipo  $sp^3$ , com configuração molecular que inclui ligações de hidrogênio. Isso resulta em um material macio e de baixa densidade. O band gap óptico está na faixa de 2 eV a 4 eV. Um método comum de deposição é o uso de baixos níveis de diferença de voltagem no processo de deposição de vapor químico intensificado por plasma (PECVD) (Koidl *et al.*, 1991).
2. **Revestimento Diamante de Carbono Amorfo Hidrogenado (DLCH):** Esse tipo de revestimento contém um teor moderado de hidrogênio, geralmente entre 20% e 40%. Embora contenha menos ligações  $sp^3$  em comparação com o PLCH, a maioria das ligações  $sp^3$  são do tipo C-C, conferindo ao revestimento melhores propriedades

mecânicas. O band gap óptico está na faixa de 1 eV a 2 eV. A deposição desse tipo de revestimento é frequentemente realizada por meio de PECVD (KOIDL *et al.*, 1991), ressonância cíclotron de elétrons (ECR) ou pulverização reativa em baixa tensão de polarização (Yoon *et al.*, 2002).

3. **Carbono Amorfo Tetraédrico Hidrogenado (ta-C:H):** Este revestimento compartilha semelhanças com o DLCH, mas se diferencia pela maior presença de ligações CC na banda sp<sup>3</sup>, mantendo um teor de hidrogênio fixo, que fica entre 25% e 30%. Cerca de 70% das ligações no ta-C:H são do tipo sp<sup>3</sup>. Suas propriedades incluem uma densidade de aproximadamente 2,4 g/cm<sup>3</sup> e um módulo de elasticidade longitudinal de Young de até 300 Gpa (Ferrari *et al.*, 2000). O band gap óptico pode chegar a 2,4 eV (Morrison *et al.*, 1999). A deposição desse revestimento muitas vezes envolve fontes de plasma de alta densidade, como a ressonância cíclotron de elétrons (ECWR) (Weiler *et al.*, 1998) e a fonte de feixe de plasma (PBS) (Weiler *et al.*, 1996).
4. **Revestimento de Grafite de Carbono Amorfo Hidrogenado (GLCH):** Esse tipo de revestimento possui um baixo teor de hidrogênio, cerca de 20%. A maioria das ligações são do tipo sp<sup>2</sup>. O band gap óptico é inferior a 1 eV. A deposição desse revestimento pode ser realizada por meio de deposição de vapor de carbono aprimorada por plasma (PECVD) com alta polarização (Robertson, 2002b), descarga de corrente contínua incandescente (GD) (Meyerson; Smith, 1980) ou pulverização catódica de magnetron (MS) (Fanchini *et al.*, 2002).

A Figura 1 ilustra a relação entre a quantidade de hidrogênio e os quatro tipos de revestimentos de carbono amorfo hidrogenado, proporcionando uma compreensão visual das diferenças entre eles.



Fonte: adaptado de Casiraghi; Ferrari; Robertson, (2005)

### 1.2.2 Espectroscopia Raman para encontrar parâmetros básicos de carbono amorfo hidrogenado

A espectroscopia Raman é uma técnica útil para diferenciar a densidade dos parâmetros de banda do tipo  $sp^2$  e  $sp^3$ , também fornece uma proporção dos parâmetros de conteúdo de hidrogênio (H), no entanto, a espectrometria Raman é bastante sensível aos parâmetros de banda do tipo  $sp^2$ , a maneira mais apropriada é pensar em usar o modelo de três estágios (Ferrari; Robertson, 2000, 2004). Esses espectros em termos do modelo de três estágios descrevem a evolução dos espectros Raman de carbonos em termos de um caminho de amorfização, a partir do grafite perfeito. Na análise dos espectros Raman, geralmente são mais sensíveis em bandas do tipo  $sp^2$  devido ao distúrbio nesta fase, isso se deve ao fato de que as posições dos picos variam, largura e intensidade. Consequentemente, as bandas do tipo  $sp^2$  variam dependendo do número de bandas do tipo  $sp^3$ . A combinação de técnicas de espectro Raman de diferentes comprimentos de onda (UV) fornece uma solução porque a excitação da banda do tipo G diminui com o aumento dos agrupamentos de bandas do tipo  $sp^2$ . Assim, se a combinação dos espectros Raman visível e Raman UV apresenta diferença nas bandas G, significa que os aglomerados de sítios  $sp^2$  são maiores, com isso pode-se dar uma explicação aproximada para a caracterização dos revestimentos do tipo DLC. Além disso, há outro parâmetro, verificar a ligação dos carbonos no revestimento DLC é importante, de acordo com a razão das intensidades dos picos D e G, a largura média dos picos FWHM da banda G, os tamanhos dos carbonos amorfos devido à interação ID/IG mostra a fase organizada dos sítios

$sp^2$  dispostos em anéis (Ferrari; Robertson, 2000). Se a relação entre as intensidades ID/IG for pequena, isso mostra que a fase  $sp^2$  está organizada principalmente em cadeias e não em anéis (Ferrari; Robertson, 2000).

A largura média do pico da banda G produz uma desordem estrutural enquanto a propagação da banda G produz uma desordem topológica. Isso se deve à desordem estrutural do ângulo de ligação e às distorções de comprimento, isso se deve à forma e ao tamanho da distribuição das ligações do tipo  $sp^2$ . Nas amostras com fase  $sp^2$  constituída por anéis deslocalizados, não apresentam dispersão na banda do tipo G (Ferrari; Robertson, 2004).

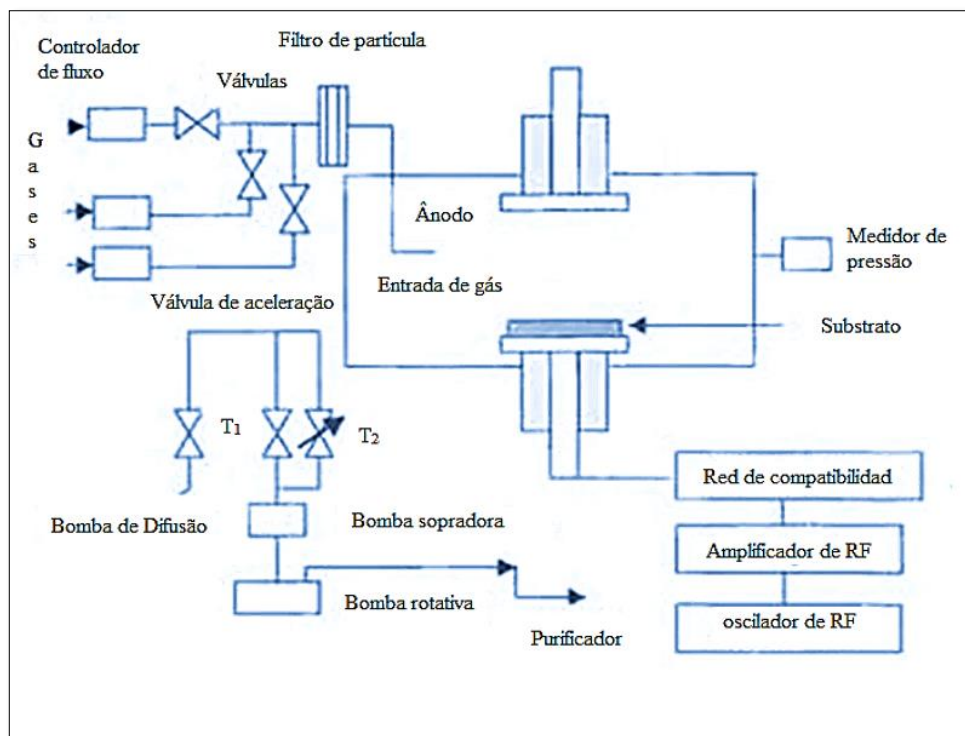
A estrutura e topologia dos carbonos de hidrogênio livre varia em paralelo ao longo da amorfização (Ferrari; Robertson, 2004). A largura média do pico FWHM de G e a dispersão aumentam à medida que a desordem aumenta para as energias de excitação (Ferrari; Rodil; Robertson, 2003). O aumento da desordem está diretamente ligado a um maior teor de  $sp^3$ , de acordo com sua densidade e suas propriedades mecânicas, o que leva a uma correlação nos diferentes espectros de comprimento Raman (Casiraghi; Ferrari; Robertson, 2005; Goswami; Jana; Ray, 2008).

Para revestimentos com baixo teor de hidrogênio (H) 20-30% em a-C:H e ta-C:H, o teor de ligações do tipo  $sp^3$  pode aumentar, embora o teor de ligações do tipo C-C na banda  $sp^3$  não aumente. A desordem estrutural diminui com o aumento do teor de hidrogênio (H), enquanto a desordem topológica aumenta, de modo que a largura média do pico FWHM de G e a dispersão de G têm tendências opostas. Devido ao conteúdo de hidrogênio (H) auxilia na análise dos espectros Raman. Ao introduzir nitrogênio, o efeito da introdução de hidrogênio no carbono amorfo une a quantidade e configuração da fase  $sp^2$  com o conteúdo total de ligações C-C  $sp^3 + C-H sp^3$ . Isso significa que apenas um comprimento de onda Raman é suficiente para quantificar os teores de hidrogênio (H) e  $sp^3$  com apenas um comprimento de onda Raman, no entanto, deve-se ter cuidado porque anéis  $sp^2$  podem aparecer em amostras de alto teor de hidrogênio (H) e essa informação pode só ser extraído quando vários comprimentos de onda Raman são usados (Ferrari; Robertson, 2004). Finalmente, o mais útil de todos os itens acima é que a largura média do pico FWHM da banda G pode ser medida na excitação do espectro UV Raman em cada amostra.

### 1.3 DEPOSICAO QUIMICA NA FASE VAPOR ASSISTIDA POR PLASMA

A deposição química de vapor por plasma por radiofrequência (PECVD) é a técnica mais utilizada no laboratório para a preparação de revestimentos de carbono amorfo a-C:H (DLCH) de baixo custo em comparação com outras técnicas de deposição (Bubbenzer *et al.*, 1983; Catherine, 1991; Wild; Koidl, 1989). O reator tem dois eletrodos de dimensões de área diferentes. A potência de RF é acoplada ao eletrodo menor que geralmente é onde os substratos são colocados, o outro eletrodo é conectado diretamente à terra. A nuvem de plasma é gerada entre os eletrodos devido ao movimento de elétrons com excesso de íons, isso cria uma carga positiva no plasma igual à corrente média de elétrons e íons para a parede (Lieberman; Lichtenberg, 1994), conforme mostrado na Figura 2.

**Figura 2.** PECVD RF para deposição de carbono tipo diamante.



Fonte: adaptado de Lieberman; Lichtenberg, (1994)

A interface entre o gás de plasma e as paredes da câmara atua como um diodo, fazendo com que os eletrodos obtenham tensões DC auto polarização que são equivalentes às tensões de pico de RF. A tensão de RF das paredes e eletrodos atua como um capacitor de placas paralelas. Conseqüentemente, a tensão de auto polarização DC varia inversamente com a área

do eletrodo da cúpula, como pode ser visto na equação 1. (Catherine, 1991; Lieberman; Lichtenberg, 1994; Robertson, 2002b).

$$\frac{\varphi_1}{\varphi_2} = \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 \quad (1)$$

Onde  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$  são as tensões em cada capacitor e  $A_1$  e  $A_2$  são áreas do cada um dos eléctrodos. O eletrodo de área menor tem uma capacitância menor, isso significa que ele assume uma tensão de polarização maior e assume um valor negativo, tornando-o mais útil para uso como eletrodo substrato. A tensão negativa na interface entre a parede e o plasma acelera os íons positivos no eletrodo substrato, para criar ligações do tipo  $sp^3$ . No caso de plasmas de radiofrequência de baixa pressão, isso é excitado pelo acoplamento de radiofrequência das interfaces entre o plasma e as paredes. Em altas pressões, o plasma é excitado pelo aquecimento Joule. Em depósitos de revestimento do tipo DLC, o plasma geralmente funciona em baixa pressão, isso porque pode maximizar a fração de íons, porém, em pressões da ordem de 50m torr, o fluxo de revestimentos é apenas cerca de 10% dos íons. A energia dos íons pode ser perdida devido a colisões durante a aceleração das partículas dentro do reator, para reduzir essa perda é útil e necessário diminuir ainda mais a pressão, assim a probabilidade de interação entre as partículas é menor, o gap da interface entre as paredes e o plasma aumenta com o aumento da pressão (P), dada pela equação 2 (Lieberman; Lichtenberg, 1994; Robertson, 2002a).

$$d = kP^{-1/2} \quad (2)$$

Tomando o comprimento de Debye como referência, enquanto o livre caminho médio dos íons diminui quando  $\lambda = k'/P$ , a razão entre  $\lambda/d$  escala como  $P^{-1/2}$  e o livre caminho médio diminui em relação à interface entre as paredes e plasma a pressões consideravelmente baixas. Para que a pressão diminua, pode ser gerado um campo magnético, com o qual o plasma fica confinado, isso faz com que o comprimento entre os elétrons aumente, e com isso as partículas ionizadas têm um caminho mais eficiente para atingir o alvo. Com uma pressão de  $5 \times 10^{-4}$ , o caminho livre dos íons excede a espessura da interface entre as paredes e o plasma, assim a energia dos íons tem uma distribuição restrita (Robertson, 2002b).

As propriedades fundamentais do plasma são apresentadas na equação 3 a densidade do plasma  $n_0$  e a temperatura dos elétrons  $T_e$ , o importante é maximizar a pressão do plasma, esta deve ser da ordem de uma distribuição de energia de Maxwell da seguinte maneira

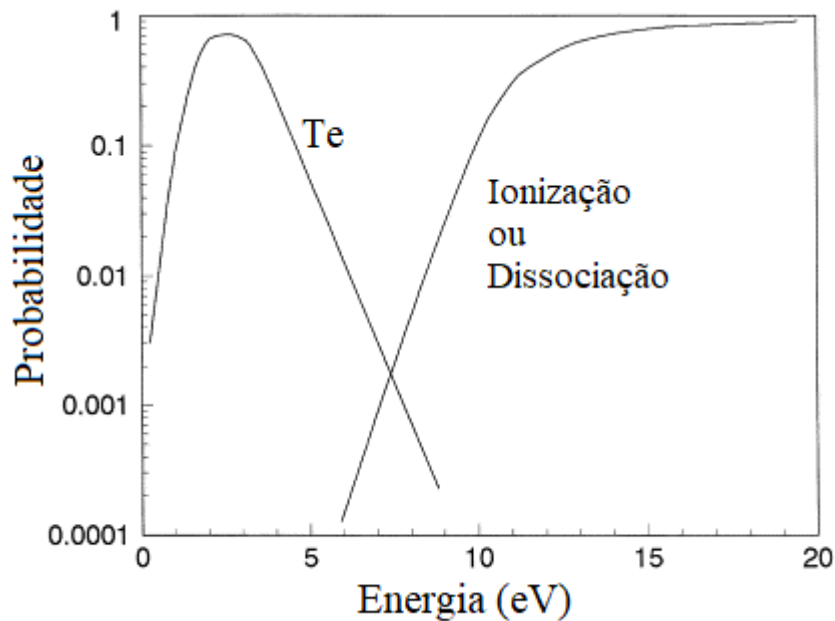
$$N(E) = n_0 \exp\left(-\frac{E}{kT_e}\right) \quad (3)$$

Elétrons que têm energias maiores que o limiar de choque com espécies ionizadas neutras podem ser vistos como uma convolução da seguinte forma

$$N_i = \int n_0(E, T_e) f_i(E) dE \quad (4)$$

Onde  $f_i$  é a probabilidade de ionização que pode ser vista na Figura 3 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** em uma faixa de energia limitada, pode-se ver que

**Figura 3.** Temperatura do elétron  $T_e$  e a probabilidade de dissociação/ionização de uma espécie.



Fonte: Adaptado de (Lieberman; Lichtenberg, 1994; Robertson, 2002b)

Onde a faixa limitada de energia é dada por:

$$N_i \approx N_0 \exp\left(-\frac{E_i}{kT_e}\right) \quad (5)$$

Onde  $E_i$  é o potencial de ionização em um determinado valor de  $T_e$ . Desta forma, relações semelhantes são mantidas para as espécies atômicas dissociadas e excitadas, onde  $N_p$  e  $T_e$  são encontrados como requisitos de equilíbrio de revestimento (Lieberman; Lichtenberg, 1994). A partir das condições de estabilidade pode-se observar que o valor de  $T_e$  deve estar associado à taxa de geração de íons no plasma, considerando a perda de radicais e íons nas paredes como segue

$$K_i N_p n_0 V = n_0 u_B A \quad (6)$$

Fazendo cálculos básicos obtemos

$$\frac{K_i(T_e)}{u_B(T_e)} = \frac{A}{N_p V} \quad (7)$$

Considerando que  $A = l^2$  e  $V = l^3$  então podemos ter:

$$\frac{K_i(T_e)}{u_B(T_e)} = \frac{l^2}{N_p l^3} \quad (8)$$

Onde  $l$  é o comprimento efetivo do plasma,  $A$  e  $V$  são a área de superfície e o volume do plasma,  $n_0$  é a densidade do plasma,  $N_p$  é a densidade dos átomos no gás,  $K_i$  é a constante da taxa de ionização e  $u_B$  é a velocidade de Bohm dos elétrons,

$$\frac{K_i(T_e)}{u_B(T_e)} = \frac{1}{N_p l} \quad (9)$$

olhando para a equação 9. pode-se ver que  $K_i$  e  $u_B$  são funções de  $T_e$ . Em termos energéticos, o balanço energético da densidade do plasma  $n_0$  está associado ao potencial absorvido pelo plasma  $W$ , que é apresentado na equação 10

$$n_0 = \frac{W}{e u_B A E_T} \quad (10)$$

A deposição de revestimentos de carbono amorfo hidrogenado (DLC) requer a escolha cuidadosa de gases precursores para garantir a qualidade desejada do revestimento, bem como para atender às necessidades específicas de aplicação. A seleção do gás precursor desempenha um papel crucial na obtenção das propriedades desejadas do DLC e na prevenção de reações químicas indesejadas que possam alterar a estrutura final do material (Bubbenzer *et al.*, 1983a).

1. **N-Benzeno:** O n-benzeno é um precursor frequentemente utilizado devido à sua capacidade de proporcionar uma taxa de crescimento controlada. Isso se deve à interação dos elementos com a superfície e à ionização do gás, que resulta em uma taxa de crescimento mais baixa. No entanto, é essencial escolher gases que não afetem negativamente a estrutura do carbono amorfo hidrogenado.
2. **Acetileno:** O acetileno é outro gás precursor amplamente aceito na deposição de carbono amorfo. Possui uma tensão de polarização de 200 V, fornecendo átomos de carbono com uma energia de 100 eV. Além disso, o acetileno possui fortes ligações do tipo C=C, tornando-o uma opção simples e eficaz. Os íons  $\text{C}_2\text{Hn}^+$  são os principais produtos resultantes da decomposição do acetileno durante a deposição (Weiler *et al.*, 1996). No entanto, é importante notar que o acetileno não é encontrado na forma pura e

pode causar dopagem nos revestimentos, tornando-o menos adequado para aplicações eletrônicas.

3. **Metano:** O metano é utilizado em revestimentos para aplicações eletrônicas devido à sua alta pureza. No entanto, apresenta uma taxa de crescimento mais lenta e contém um teor mais elevado de hidrogênio (Robertson, 2002b). Portanto, sua escolha depende das prioridades específicas da aplicação, como a busca por pureza em aplicações eletrônicas.

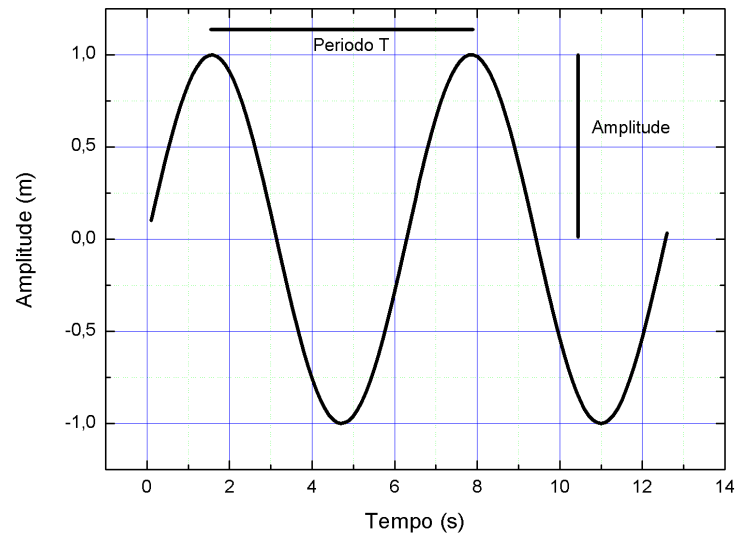
#### 1.4 FORÇA APLICADA SOBRE UMA CORDA TENSIONADA

O estudo das ondas na natureza é bem conhecido, pois quase todos os sistemas naturais podem ser observados como vibrações ou oscilações, isso significa que os sistemas naturais podem ser simulados ou caracterizados como sistemas vibracionais ou oscilantes, por um lado, pequenos corpos vibram rapidamente, enquanto os grandes, lentamente, uma característica importante desses movimentos é sua periodicidade, o que significa que o sistema físico se repete indefinidamente (French, 2017).

**Neste caso, pode-se observar uma onda senoidal onde podemos identificar que à medida que o tempo passa no eixo  $x$ , a onda mantém sua amplitude, e seu mesmo período  $T$ , conforme pode ser visto na**

Figura 4.

**Figura 4.** Onda senoidal onde o período e a amplitude da onda são apresentados.



Fonte: Autor

### 1.4.1 Vibrações senoidais

A força exercida por este sistema utilizando onda senoidal obtida a partir de um corpo de massa conhecida  $m$ , pendurado em uma mola amarrado a um suporte, sem considerar o atrito com o ar ou qualquer fluido para que o sistema oscile uniformemente no tempo e mantenha a amplitude; será calculada por

$$F(x) = -(k_1x + k_2x^2 + k_3x^3 + \dots + k_nx^n) \quad (11)$$

Onde se pode ver que  $k_1, k_2, k_3 \dots k_n$ , são uma série de constantes, e sempre se pode encontrar um intervalo de valores de  $x$  onde os valores dos expoentes mais altos podem ser desprezados de acordo com um critério anterior, comparado ao primeiro termo  $-k_1x$ , de acordo com isso, a equação de movimento é expressa da seguinte forma

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -k_1x \quad (12)$$

Onde se pode ver que uma das soluções desta equação é dada pela expressão

$$x = A \sin(\omega t + \varphi_1) \quad (13)$$

Onde o valor  $\omega = (k_1/m)^{1/2}$  onde está simples descrição da onda senoidal deste sistema físico (movimento harmônico simples) pode mostrar um fenômeno com boa aproximação em pequenos movimentos, da mesma forma temos que saber que não é o movimento real (French, 2017).

### 1.4.2 Oscilador Amortecido

No caso anterior, observa-se que a amplitude permanece constante, mas na realidade, na maioria dos sistemas físicos, a amplitude dos movimentos oscilatórios diminui com o tempo, isso se deve ao fato de existirem forças externas que absorvem a energia do corpos em movimento, movimento, através de algum tipo de dissipação de energia, seja por atrito, viscosidade ou outro, etc., de acordo com isso, esse tipo de movimento é chamado de oscilador amortecido, para detalhar isso, vamos supor um corpo que está imerso em algum tipo de som, no caso das cordas do violão o fluido onde elas se movem é o ar e isso produz atrito, vamos considerar essa força de atrito proporcional à velocidade  $F_r = -\lambda v$ , onde  $\lambda$  é uma constante de amortecimento e  $v$  é a velocidade em cada instante, que deve ser somada à força restauradora harmônica, pois é uma força contrária à força de amortecimento, ela se opõe ao movimento, a equação de um corpo submetido a estas forças é dada por

$$F_t = F + F_r = ma = -k_r x - \lambda v \quad (14)$$

que pode ser escrito da seguinte forma

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \lambda \frac{dx}{dt} + k_r x = 0 \quad (15)$$

Ou como

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\gamma \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0 \quad (16)$$

Onde podemos ver que  $2\gamma = \lambda/m$  e  $\omega_0^2 = k_r/m$  que este último é a frequência natural do oscilador ou frequência angular sem amortecimento. A solução para a equação 16 será definida de forma complexa e geral como segue

$$x = Ae^{Bt} \quad (17)$$

Dependendo da constante arbitrária  $A$  (geralmente complexa) que será determinada em cada caso para as condições iniciais além disso observaremos que  $B$  não é independente, para

isso o que será feito é tomar a equação 17 e será derivada em relação ao tempo e será substituída na equação 16, com isso chegamos à seguinte relação

$$B^2 + 2\gamma B + \omega_0^2 = 0 \quad (18)$$

Onde pode ser visto que a equação 18 pode ser resolvida como uma equação quadrática, onde serão encontradas 2 soluções possíveis que podem ser vistas da seguinte forma

$$B = -\gamma \pm \sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2} \quad (19)$$

A solução oscilatória se definirmos  $\omega_0^2 > \gamma$ , a raiz quadrada será um número complexo e podemos escrever

$$B = -\gamma \pm i\sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2} \quad (20)$$

Sendo a solução geral a superposição dessas duas soluções da seguinte forma

$$x = e^{-\gamma t} (A_1 e^{i\omega t} + A_2 e^{-i\omega t}) \quad (21)$$

Onde  $\omega$  foi denotado como a frequência angular do oscilador amortecido

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2} = \sqrt{\left(\frac{k_r}{m} - \frac{\lambda^2}{4m^2}\right)} \quad (22)$$

Uma solução física deve sempre ser uma solução real, para que isso seja verdade as constantes  $A_1$  e  $A_2$  devem ser conjugadas complexas como segue:  $A_1 = \frac{1}{2} A e^{-i\alpha}$  e  $A_2 = \frac{1}{2} A e^{i\alpha}$ , permanecendo como solução geral da seguinte forma

$$x = \frac{1}{2} A e^{-\gamma t} (e^{i(\omega t - \alpha)} + e^{-i(\omega t - \alpha)}) \quad (23)$$

Quando  $\omega_0 > \gamma$ ,  $\omega$  é real e a solução é a seguinte

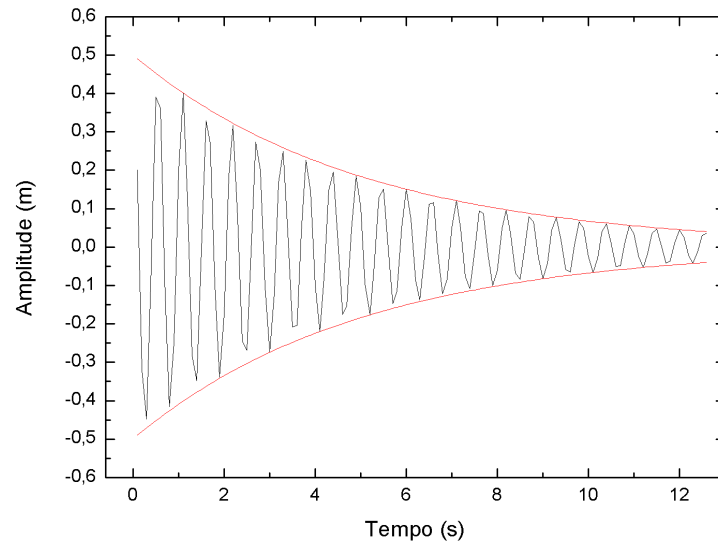
$$x = \frac{1}{2} A e^{-\gamma t} \cos(\omega t - \alpha) \quad (24)$$

Esta última equação corresponde ao movimento oscilante de frequência angular  $\omega$ , tanto na equação 23 quanto na equação 24 aparecem os valores de  $A$  e  $\alpha$ , que são constantes arbitrárias que são determinadas a partir das condições iniciais do problema.

Esta solução apresenta dois fatos importantes, o primeiro é que a amplitude das oscilações não é constante, pois diminui devido à perda de energia do oscilador à medida que relaxa. O segundo fato é que a frequência depende do amortecimento, pois conforme o oscilador é amortecido, o período aumenta e a frequência de oscilação diminui (DOMINGO, 2020).

A Figura 5 contém um desenho esquemático da variação da amplitude em função do tempo, pode ser visto o formato decrescente da amplitude no tempo em função da reverberação do som produzido pela corda do instrumento.

**Figura 5.** Oscilador Amortecido



Fonte: Autor

### 1.4.3 Noções de física ondulatória (ondas em uma corda)

Para obter a equação de onda associada a uma corda com densidade de massa constante  $\rho$  (massa/comprimento), pode-se tomar um segmento  $ds$ , conforme mostrado na figura 6, a corda é descrita por  $s(x,t)$ . Levando isso em conta, é possível obter uma força e, portanto, uma aceleração do sistema. Supondo que os deslocamentos da corda sejam pequenos na direção do eixo  $x$ , a massa do pequeno segmento  $dm = \rho ds$  como os componentes horizontais da tensão são aproximadamente iguais e opostos desprezamos, tendo força apenas na direção  $dq$  (Marion; Coma; Ferrer, 2014).

$$\Delta F = \rho ds \frac{\partial^2 q}{\partial t^2} \quad (25)$$

Onde  $\Delta F$  representa a diferença de tensão em  $x$  e  $x+dx$ . Para descrever a aceleração, usamos derivadas parciais  $\partial^2 q / \partial t^2$  porque a dependência do deslocamento no eixo  $x$  em  $q(x,t)$

não é considerada. A força de tensão é considerada apenas no componente do eixo  $q$  (Marion; Coma; Ferrer, 2014).

$$(\Delta F)_y = -\tau \sin \theta_1 + \tau \sin \theta_2 \quad (26)$$

Onde podemos fazer a aproximação  $\sin \theta \approx \tan \theta$  levando em conta que, para ângulos tão pequenos, esses deslocamentos podem ser quase iguais.

$$(\Delta F)_y = -\tau \tan \theta_1 + \tau \tan \theta_2 \quad (27)$$

Pelas propriedades trigonométricas e observando a Figura 5, pode-se ver que  $\tan \theta = \partial q / \partial x$  e, portanto, obtemos que

$$(\Delta F)_y = -\tau \left. \frac{\partial q}{\partial x} \right|_x + \tau \left. \frac{\partial q}{\partial x} \right|_{x+dx} \quad (28)$$

Resolvendo em cada um dos contornos do segmento, pode-se obter que

$$(\Delta F)_y = \tau \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} dx \quad (29)$$

Agora se pode assumir que  $ds \approx dx$ , e substituindo a equação 29 na equação 25, temos que

$$\tau \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} dx = \rho dx \frac{\partial^2 q}{\partial t^2} \quad (30)$$

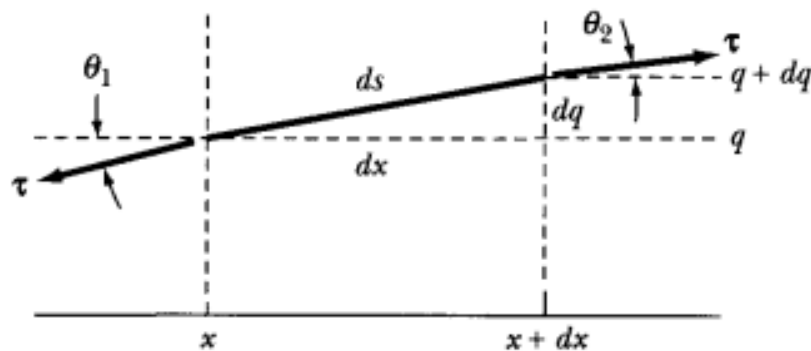
Então, finalmente, organizando melhor a equação 30, temos a equação de onda

$$\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} - \frac{\rho}{\tau} \frac{\partial^2 q}{\partial t^2} = 0 \quad (31)$$

que, finalmente, a equação 31 é exatamente a mesma que a equação de onda (MARION; COMA; FERRER, 2014).

**Figura 6.** É mostrada uma parte, de comprimento  $ds$ , de uma corda fixada em ambas as extremidades.

O deslocamento do equilíbrio é  $q$  à esquerda e  $q + dq$  à direita. As tensões  $\tau$  em cada extremidade são iguais em magnitude, mas não em direção. Somente ondas transversais são consideradas.



Fonte: Adaptado de Marion; Coma; Ferrer, (2014)

#### 1.4.4 Equação da onda e ondas estacionárias

Para a vibração de uma corda em uma dimensão, a equação de onda tem a seguinte forma

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} - \frac{\rho}{\tau} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = 0 \quad (32)$$

onde o valor de  $\rho$  é a densidade linear de massa que tem unidades de massa/comprimento ( $\text{ML}^{-1}$ ), onde  $\tau$  é a tensão da corda e tem unidades de massa por comprimento/tempo ao quadrado ( $\text{MLT}^{-2}$ ) e  $\Psi$  é a função de onda. Na equação, podemos ver que  $\rho/\tau$  tem unidades de tempo ao quadrado/comprimento ao quadrado ( $\text{T}^2\text{L}^{-2}$ ), que são as dimensões inversas da velocidade ao quadrado e, com isso, podemos dizer que  $\sqrt{\tau/\rho} = v$ , portanto, nossa equação de onda será igual a

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = 0 \quad (33)$$

onde  $v$  é a velocidade da propagação da onda na corda (Marion; Coma; Ferrer, 2014).

Para resolver a equação de onda 33, temos que restringir o caso para ondas harmônicas que se propagam em direções opostas da corda e, com isso, a solução obtida é em termos de ondas estacionárias como segue

$$\psi(x, t) = \frac{A}{2} \cos(kx - \omega t + \alpha_1) + \frac{A}{2} \cos(kx + \omega t + \alpha_2) \quad (34)$$

$$\psi(x, t) = A \cos(kx + \beta) \cos(\omega t + \delta)$$

Sendo  $\beta = \frac{1}{2}(\alpha_1 - \alpha_2)$ ,  $\delta = \frac{1}{2}(\alpha_1 + \alpha_2)$  e  $\omega = kv$  pode se notar que esta onda não se

propaga.

Agora, para uma corda com extremidades fixas, definimos as condições de limite que são  $\psi(0, t) = 0$  e  $\psi(l, t) = 0$ . Ao estabelecer esse parâmetro, podemos encontrar o valor de  $\beta$  e os possíveis valores de  $k$

$$\beta = \frac{\pi}{2} \quad (35)$$

$$k_n = \frac{n\pi}{l}, \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (36)$$

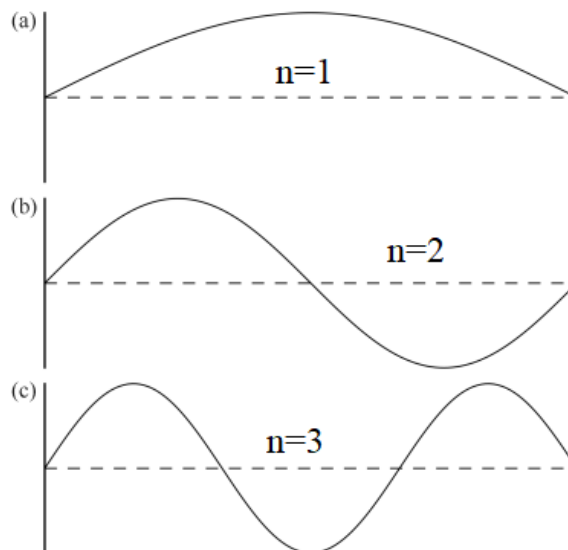
$$\omega_n = \frac{n\pi v}{l}, \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (37)$$

Onde as soluções, ou modos normais que são obtidos são

$$\psi(x, t) = A_n \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) \cos\left(\frac{n\pi v t}{l} + \delta_n\right) \quad (38)$$

Onde os valores das constantes  $A_n$  e  $\delta_n$  são determinados a partir das condições iniciais do sistema. Ao observar o gráfico dos modos normais de oscilação de uma corda com extremidades fixas no instante em que a parte do tempo é máxima, é possível identificar que há alguns pontos que permanecem estacionários em todos os momentos e são chamados de nós, em que os nós são sempre fixos e têm uma relação de acordo com  $n-1$ , conforme mostrado na Figura 7 (Marion; Coma; Ferrer, 2014).

**Figura 7.** Modos normais de uma corda vibrante para: (a)  $n = 1$ ; (b)  $n = 2$ ; (c)  $n = 3$ . Note que a onda estacionária possui  $n - 1$  nós



De acordo com os fundamentos das cordas oscilantes, cada corda tem uma frequência fundamental de acordo com

$$v_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} = \frac{v}{2l} = \frac{\sqrt{\tau/\rho}}{2l} \quad (39)$$

e as outras frequências associadas a essa corda oscilante são números inteiros associados à frequência fundamental.

$$v_n = nv_1; \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (40)$$

A solução geral é uma combinação linear de todos os modos normais

$$\Psi(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \psi_n(x, t) \quad (41)$$

Tomando a equação 41 como resultado, podemos ver que a solução da função de onda associada a uma corda tensionada é a soma de todos os incrementos dos modos normais de cada

uma, ou seja, como temos frequências fundamentais e suas frequências associadas, então as contribuições serão a frequência fundamental mais as frequências associadas a ela. Um caso simples pode ser mostrado quando temos 2 ondas  $\psi_1(x, t)$  e  $\psi_2(x, t)$  com velocidades de propagação  $v$  iguais e frequências próximas uma da outra, então sabemos o que

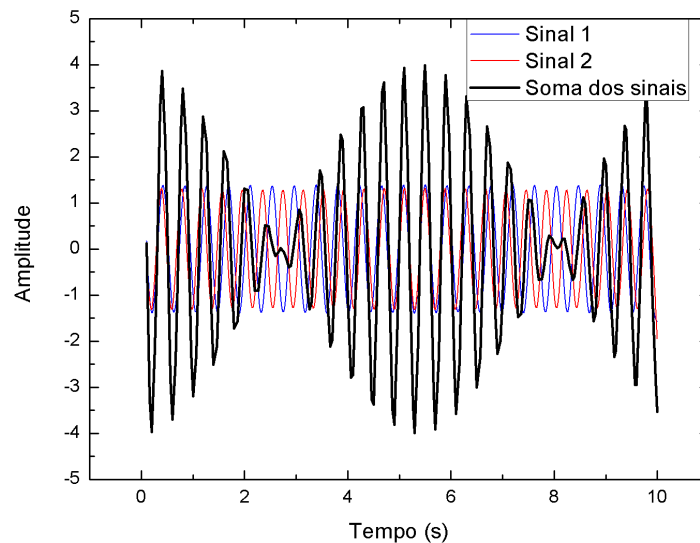
$$\Psi(x, t) = \psi_1(x, t) + \psi_2(x, t)$$

$$\Psi(x, t) = \frac{A}{2} \cos[(k + \Delta k)x - (\omega + \Delta\omega)t] + \frac{A}{2} \cos[(k - \Delta k)x - (\omega - \Delta\omega)t] \quad (42)$$

$$\Psi(x, t) = A[\cos(\Delta kx - \Delta\omega t) \cos(kx - \omega t)] \quad (43)$$

Para o caso sem dispersão, é dizer que a velocidade de propagação no meio não depende do número de onda, neste cenário a velocidade de fase ( $\omega/k$ ) é igual á velocidade do grupo ( $d\omega/dk$ ). Temos que  $\omega = kv$  e  $\Delta\omega = \Delta kv$ , de modo que o resultado é um pacote de onda, conforme se ilustra na Figura 8.

**Figura 8.** O gráfico mostra dois sinais, um azul e outro vermelho, que têm frequências próximas e o gráfico preto representa a soma dos sinais.



Fonte: Autor

## 1.5 VIOLÃO

Tendo em vista a importância deste projeto, é necessário rever alguns aspectos históricos sobre o surgimento e evolução do violão, como se tornou o instrumento que hoje conhecemos, claramente essa história pode ser longa, e aqui serão apresentados apenas dados importantes para ter uma ideia, em um contexto geral.

### 1.5.5 História

O uso de instrumentos com características semelhantes ao violão em civilizações como babilônios, sumérios, caldeus, assírios, hititas, hebreus, egípcios etc., principalmente instrumentos de cordas, eram bastante comuns e embora fossem modelos primitivos construídos com tripas e conchas de animais, muitos deles podem ser considerados ancestrais daqueles que serão comuns na Europa durante a Idade Média. O primeiro modelo definido e generalizado da Violão clássica ou espanhola surgiu nos reinos hispânicos da Península Ibérica entre os séculos XIV e XV, tendo as suas formas sido posteriormente adotadas pelos restantes países europeus (Ramos Altamira, 2010).

Existem 2 teorias sobre a origem dos ancestrais do violão, a primeira hipótese afirma que o instrumento vem das formas musicais greco-latinas e cristãs que chegaram à Península Ibérica do sul da Europa, a segunda seria a que defende que o violão vem das culturas árabe e muçulmana que entraram na Península pelo norte da África. Levando em conta que a primeira hipótese apresentada acima se baseia principalmente na indicação de que a origem primitiva do violão é dada por kithara (cítara) como tradução do nome latino feito pelos gregos, uma vez que este instrumento é mais parecido com a lira do que ao violão, que com o tempo foi modificado para ser uma lira com um braço mais parecido com o alaúde e junto com outros instrumentos como a viola, difundidos por todo o Império Romano devido à sua expansão, cítaras e Violões foram derivadas do latim a partir de então vários instrumentos muito semelhantes e de uso bastante comum nos reinos hispânicos da Idade Média como la Cítola, la Cedra, la Vihuela o la Fídula, que em sua maioria se tocavam com arco y que dariam passo a novos instrumentos como na Violão latina o na vihuela de mão (Ramos Altamira, 2010).

A segunda hipótese levanta a origem primitiva do violão em instrumentos árabes como o Tonbur e o Alaúde. O Tonbur era um instrumento comum nas culturas assiro-caldéia e persa, onde era conhecido como Tanbur ou Pandura, tinha um tampo em forma de pêra e pescoço alongado, enquanto o alaúde surgiu de outro instrumento oriental chamado Barbat, e embora seu corpo também era em forma de pêra como o Tonbur, o pescoço era mais curto e unido ao corpo e com o pegbox ou cabeça do pescoço torcido para um lado (Ramos Altamira, 2010).

Por fim, não há comprovação científica sobre a hipótese de como chegamos ao violão moderno ou espanhol, mas se levarmos em conta que durante a maior parte do período medieval em que o violão foi formado, reinos cristãos e muçulmanos disputaram o território do Península Ibérica, a convivência forçada produziu uma mistura constante de populações e culturas, parece lógico pensar que a Violão, mais do que um instrumento musical de raízes apenas europeias ou árabes, deve ser considerada como um instrumento que nasceu da união de ambas correntes em Espanha, como consequência do contacto frequente, intercâmbio e influência mútua das culturas musicais hispano-cristãs e hispano-muçulmanas. Em outros países europeus como França, Inglaterra ou Alemanha termos semelhantes a Violão (quinterne, guiterne, guitere, gittern...) alaúdes que derivarão na Cittern inglesa ou na Cítara renascentista, embora a partir da grande difusão da Violão espanhola no século XVII o termo Violão só será usado para o modelo original da Espanha. (Ramos Altamira, 2010).

Instrumentos na Idade Média que antecederam a Violão espanhola que hoje se conhece, se dá devido à profissionalização dos trovadores e menestrelis já que usavam esses instrumentos para acompanhar suas canções, poemas e histórias que eram levadas aos tribunais; o protagonismo dessas canções naquela época eram quatro instrumentos com características semelhantes: mastro, tampo, dupla ordem de cordas, o que dava maiores possibilidades de interpretações, os instrumentos que possuem essa referência são: o alaúde, a vihuela de mano, o Violão mourisca e a Violão latina, cujas formas mais primitivas podem ser vistas na Figura 9 do século XIII das Cantigas de Santa María de Rey Alfonso X o Sábio.

**Figura 9.** Da esquerda para a direita, Violão mourisca, Violão latina, vihuela e alaúde.



Fonte Autor.

Para que a Violão espanhola que conhecemos tenha a importância que tem agora, ela teve que passar por muitas mudanças, nos primeiros anos, a Violão de quatro pratos foi inicialmente relegada ao uso popular e obscurecida pela técnica superior do vihuela, em alguns países. Como Itália, Inglaterra e França, era utilizada por músicos da corte, mais sendo um instrumento secundário, devido ao destaque do alaúde, porém os alaudistas franceses entre os anos de 1551 e 1555 começaram a publicar obras exclusivas para Violão de quatro pratos; Nove livros com tablatura para violão foram publicados em Paris, compostos pelos alaudistas Adrien Leroy, Guillaume de Morlays, Gregor Brayssing e Simon Gorlier, que incluíam principalmente fantasias, danças e acompanhamento de salmos e canções. As primeiras composições para violão de quatro cursos a aparecer em uma publicação musical são as seis peças que foram incluídas na obra do vihuelista espanhol Alonso Mudarra, Três Livros de Música Vihuela, publicada em 1546. Também nessa época, o alaúde italiano Melchior de Barbieris ele introduziu em suas obras alguma composição para violão de quatro cursos, e mais tarde são conhecidas as 24 peças que o italiano Paolo Virchi incluiu em sua obra Tablatura de 1574 (Ramos Altamira, 2010).

Para que o violão progredisse artisticamente e fosse reconhecido por grupos seletos de músicos, foi necessário que uma dupla quinta ordem de cordas fosse incorporada no século XVI, isso deu ao instrumento grande sucesso no final do século nas cortes e palácios, devido ao fato de que com esta modificação, acompanhou as novas danças em moda entre a aristocracia, o violão de cinco pratos começou a se espalhar amplamente na Espanha e da Espanha seu uso se espalhará para o resto do continente, devido ao fato que se tornaria a principal estrela das festas e encontros sociais em vários países europeus. Assim, a partir do

final do século XVI, a Violão de cinco pratos tornou-se o modelo padrão em Espanha, e mais tarde em toda a Europa, e a Violão de quatro pratos Violões desapareceram completamente da cena musical, a publicação em 1596 do primeiro tratado sobre o instrumento: "violão espanhol de cinco ordens", escrito pelo médico e músico catalão Joan Carles i Amat (1572-1642), um texto prático e simples no qual foram explicadas as posições dos acordes básicos para dedilhar e que alcançou um sucesso extraordinário em toda a Europa. Joan Carles i Amat em 1596, publicou seu curto e famoso tratado Violão espanhola de cinco ordens, instruindo principalmente no estilo dedilhado para acompanhar danças da época, como galhardas, villanos, pavanillas, paseos e italianos. Para facilitar o aprendizado dos acordes principais, Amat numera os 12 acordes maiores e 12 menores, Girolamo Montesardo, considerado o primeiro a usar letras para identificar acordes em composições para violão, sistema que ficaria conhecido como Alfabeto e que se espalharia por toda a Itália e Espanha durante o período barroco (Ramos Altamira, 2010).

Na época barroca, a Violão ainda está ligada às danças da corte, devido à obra "Instrução da música na Violão espanhola", publicada em 1674 pelo violonista espanhol formado na Itália Gaspar Sanz (1640-1710), esta obra teve uma variedade de danças populares com explicações didáticas para sua interpretação, dando um salto em ambientes cultos, pois incluía várias obras de arrancada de grande qualidade e execução exigente, por alguns anos na Espanha surgiram outras obras que não eram tão importantes quanto a de Gaspar Sanz, até que o violonista maiorquino Francisco Guerau, que foi músico na câmara de Carlos II, publicou a obra "Poema harmônico" (Madri, 1694), esta obra tinha composições com um estilo exclusivo de dedilhado, especialmente desfiles e diferenças de danças, isso mostrava que o estilo de depenagem havia sido imposto no final do século XVII (Ramos Altamira, 2010).

Por outro lado, na Itália outros grandes artistas apareceram na época barroca, um dos principais foi Francesco Corbetta (1615-1681), que foi o professor em Bolonha do mais importante violonista da escola bolonhesa Giovanni Granatta, Corbetta deixou a corte do duque de Mântua e transferido para a corte da França, ele também instruiu o violonista francês Robert de Visée e foi professor particular do rei Luís XIV e seu filho, passando pela Inglaterra como professor do rei Carlos II; Aos dois monarcas dedicaria um dos dois volumes de sua obra fundamental, *Guitare Royale*, publicado em 1671 e 1674. Na França, Robert de Visée, também cantor e teórico da corte, compôs duas obras para violão de grande qualidade: "Livre de guitare dediée au Roi (1682)" e "Livre de pièces pour la guitare (1686)", outro que também alcançou considerável fama na França François Champion, músico da Ópera e da Real Academia de Paris

e autor de um brilhante tratado sobre o violão “Nouvelles découvertes sur la guitare” publicado em Paris em 1705. Da França, a paixão pelo violão se espalhou para a Holanda, e na Bélgica encontramos o que pode ser considerado o último grande violonista do período barroco, François Lecocq, autor de uma coleção de peças para violão intitulada “Recueil de pièces de guitare (1729)” (Ramos Altamira, 2010).

Na Europa no século XVII houve um boom no uso do violão, isso fez com que a produção de violões aumentasse, sendo que a nova guilda de violeiros ao experimentar as formas do violão com isso o instrumento começou a aprimorar sua capacidade musical e a maioria dos recursos atuais, que seriam aperfeiçoados ao longo do tempo. Das mudanças transcendentais que foram vistas, principalmente uma sexta ordem (a ordem grave superior) foi adicionada, e ordens duplas foram substituídas por ordens simples (com uma única corda). Isso deu uma boa satisfação aos violonistas profissionais, pois o som do violão era mais limpo na dedilha e a afinação era mais simples, a sexta corda grave melhorava as possibilidades tonais e harmônicas e permitia o uso de baixos. Além disso, as cordas (enrolamento) para as cordas do baixo, que eram cordas feitas de fio de seda enrolado em metal, passarão a ser usadas de forma estável, substituindo as cordas de tripa. Por outro lado, para afinar as cordas da Violão, a nova cravelha mecânica metálica com cravelhas de osso ou marfim foi incorporada na cabeça do braço dos instrumentos de concerto, em vez da tradicional cabeça chata com parafusos de madeira. Outra novidade importante na construção dos violões introduzida no século XVIII foi a implantação do braço com trastes metálicos fixos, que se estenderia também até a boca do tampo, como os violões atuais. Na busca por uma sonoridade melhor, o formato do violão também variou, aumentando seu tamanho e afinando a cintura do corpo, que com a clássica figura no formato do número oito, com a metade inferior mais larga. Além disso, a partir de então, as Violões foram feitas com o orifício ou boca descoberta. Por fim, para obter um maior volume sonoro, foram incorporadas hastes de reforço fixadas na parte interna da caixa do instrumento e que permitiam uma melhor projeção do som (Ramos Altamira, 2010).

O construtor e artesão Antônio de Torres Jurado (Almería, 1817-1882), que fez as maiores e mais importantes mudanças, padronizando a forma atual da Violão clássica, entre as quais o aperfeiçoamento do sistema de reforço com hastes de madeira em forma de leque que foram fixadas na parte interna do tampo para obter uma melhor projeção do som, aumentou o tamanho do tampo e a largura do braço, melhorou o desempenho da ponte, ele estabeleceu o comprimento adequado do braço da Violão e a tração das cordas, desenhou as linhas sóbrias e estilizadas do instrumento e utilizou madeiras e vernizes de primeira qualidade na fabricação

de seus modelos de concerto. A Violão obteve uma imagem impecável e um som potente, profundo e aveludado que até então não havia sido alcançado e que despertou a admiração dos grandes violonistas da época, com essas mudanças não tardou a influenciar o resto dos espanhóis e Violonistas europeus da época e construtores posteriores, que por unanimidade adotaram as regras básicas de sua técnica e desenho, convertendo o modelo de Torres Jurado a partir de então no cânone do violão clássico do nosso tempo (Ramos Altamira, 2010).

A Violão espanhola e clássica foi muito popular na Europa devido a tudo o que se viu antes, nos países da América Latina ela foi trazida com a chegada dos conquistadores espanhóis e portugueses, ao contrário do que aconteceu nos Estados Unidos, com a chegada de muitos emigrantes europeus no século XIX. XIX e algumas raízes do Sudoeste favoreceram a presença do violão na música popular do país, porém a evolução do violão nos Estados Unidos é marcada por sua transformação para o violão e posteriormente o elétrico. O pai das Violões americanas foi Christian Friedrich Martin (1796-1867), um emigrante alemão, que se estabeleceu em Nova York e depois no estado da Pensilvânia, onde desenvolveu um sistema de reforço sob o tampo com duas barras de madeira chamado X-bracing), que é um reforço diferente do feito por Torres Jurado, essa mudança na estrutura do violão tornou seu som mais aguçado, elemento importante em estilos musicais como country-wenstern, bluegrass ou blues. Isso deu o início do violão que nasceu no final do século 19, quando as cordas de aço foram introduzidas. Os descendentes de Martin em 1919 aumentaram o tamanho das Violões acústicas, criando a Violão Dreadnoughts que proporcionava um volume de som superior. Nos estilos americanos de country e bluegrass, outros modelos de Violão surgiram posteriormente, como o dobro, que incorporava uma estrutura metálica no corpo, e o lap steel guitar. O primeiro construtor nascido nos Estados Unidos foi Orville Gibson (1856-1918), que fundou sua empresa em 1902 no estado de Michigan. A empresa de Gibson começaria a investigar a implementação de captadores elétricos em Violões, isso deu lugar ao deslocamento do banjo do estilo de música country. Por outro lado, foram criadas Violões com silhueta de violino e recortes em forma de f no corpo, usadas por músicos de jazz na década de 1920. A incorporação de captadores e amplificação deu lugar às Violões eletroacústicas. Mario Maccaferri (1900-1993) que morava em Paris, introduziu no violão clássico e acústico o corte que permitia tocar os trastes mais próximos do corpo, aumentando também o número de trastes no braço de 12 para 14, com base nesse avanço será aplicado por construtores de Violão elétrica. Os construtores iniciaram a fabricação das primeiras Violões elétricas de corpo sólido, buscando um som adequado para amplificação. O construtor Leo Fender traria ao mercado a Broadcaster (Telecaster) em 1950, em 1952 Les Paul

projetou a Violão Gibson Les Paul e em 1954 a mítica Fender Stratocaster seria criada como resposta à Violão Les Paul, esses instrumentos e outros das outras empresas foram fundamentais no nascimento e desenvolvimento de estilos norte-americanos como o rock and roll, o blues e o jazz, onde o violão atingiria limites técnicos e musicais insuspeitos e superaria suas deficiências sonoras para lotar grandes auditórios (Ramos Altamira, 2010).

## 1.5.6 Tipos de violão

### 1.5.6.1 Violão espanhol ou clássico

**Figura 10.** Violão espanhol ou clássico



Fonte: Miguei Garrido, (1999)

As principais características deste tipo de violão são as seguintes: possui um conjunto de seis cordas, sendo 3 delas de nylon e as outras 3 metálicas, sua escala é mais plana e larga, não possui curvatura, o braço é mais amplo, eles são usados principalmente para interpretar gêneros musicais como flamenco, folclore sul-americano ou peças de repertório musical clássico (Miguei Garrido, 1999)

### 1.5.6.2 *Violão flamenco*

**Figura 11.** Violão flamenco



Fonte: Miguei Garrido, (1999)

Este Violão é uma variante da Violão espanhol ou clássico, seu som varia em relação às Violões clássicas, seu tamanho é menor, seus aros e barras harmônicas são colocados de forma diferente, o corpo é mais estreito, as cordas estão mais próximas. o som é menos alto e sonoro, mas produz um som mais brilhante e mais percussivo(Miguei Garrido, 1999).

### 1.5.6.3 *Violão russo*

**Figura 12.** Violão russo



Fonte:Miguei Garrido, (1999)

Esta é uma Violão de sete cordas que é a maior diferença da Violão espanhol, existem 2 tipos desta Violão: A Violão clássico mais parecida com a espanhol e a Violão cigano com cordas de aço e mais parecida com a Violão acústico (Miguei Garrido, 1999).

#### 1.5.6.4 Violão acústico

**Figura 13.** Violão acústico



Fonte: Miguei Garrido, (1999)

Características importantes desta Violão é que ela tem um braço mais fino, isso dá melhor conforto, seu som tem maior amplitude que a Violão clássica, tem cordas metálicas, estas tornam seu som metálico, duro e brilhante, as cordas têm mais tensão que as cordas de nylon, e elas estão mais próximas umas das outras, o corpo é maior, existem vários tipos desse violão como mostrado abaixo:

- Violão de Orquestra ou Auditório como também é frequentemente chamado, foi feito no século passado, e para aquela época foi um dos mais importantes; tinha um som frequentemente balanceado.
- Violão Concerto Acústico: Produz um som mais nítido e brilhante. Após este tipo, surgiram Violões maiores com mais baixo.
- Violão Dreadnought: este tipo de violão possui um corpo grande e profundo, o que permite um som potente, grande quantidade de baixos e bom volume.
- Violão Acústico Parlour: Este modelo era pequeno e fino; tinha uma forte semelhança com a Violão clássica e tornou-se muito popular no início do século XX. Tinha um cabeçote com fenda, sem pickguard e a articulação com o pescoço para o corpo no traste.
- Violão Jumbo: Considerado um violão “Cowboy”; seu corpo é grande, principalmente na parte inferior, e emite um som de grande volume com tons profundos(Miguei Garrido, 1999).

#### 1.5.6.5 Violão eletroacústico

**Figura 14.** Violão eletroacústico



Fonte: Miguei Garrido, (1999)

A principal importância deste tipo de Violão é ter um microfone instalado em seu interior, que pode ser conectado a sistemas de amplificação externos, utiliza transdutores piezoelétricos, o que permite obter um som mais agudo e natural (Miguei Garrido, 1999).

#### 1.5.6.6 Violão elétrico

**Figura 15.** Violão elétrico



Fonte: Miguei Garrido, (1999).

A Violão elétrico é um instrumento musical eletrofônico com cordas de metal, que possui um ou mais transdutores eletromagnéticos, que são chamados de captadores, que convertem as vibrações das cordas em sinais elétricos com capacidade de serem processados e amplificados. Uma das características importantes é que eles podem ser feitos de vários materiais, alguns de madeiras diferentes ou materiais sintéticos, eles possuem componentes eletrônicos que podem ser semi-sólidos, com uma pequena caixa de ressonância, captadores

piezoelétricos podem ser incluídos na ponte do Violões para capturar a vibração das cordas, uma barra de aço é geralmente incluída no braço, que serve para contrariar a tensão das cordas, o braço é colado ao corpo, os trastes são pequenas barras de aço e ficam acima do braço e perpendiculares para as cordas

Tipos de Violões elétricos.

- Violões elétricos de corpo sólido não possuem tampo.
- As Violões elétricos de corpo oco foram as primeiras a serem feitas. Eles foram amplamente utilizados no Jazz.
- As Violões elétricos de corpo semi-sólido têm um corpo menor que o normal (Miguei Garrido, 1999).

### 1.5.7 Violão

Foi utilizado um violão Tagima da série walnut-two folk, que tem braço de madeira de Mahogany, o topo do corpo é feito de madeira de Spruce e o fundo e as laterais são feitos de madeira de Walnut. Ele tem um captador piezoelétrico (recebe sinais mecânicos e os converte em sinais elétricos) e um pré-amplificador ativo de 3 bandas fishman isys+. O violão eletroacústico foi conectado a uma placa de áudio focusrite da série scarlett 18i20, que, por sua vez, foi conectada a um computador, usado para gravar o som das cordas de forma independente.

**Figura 16.** Foto esquemática do violão Tagima usado para a gravação



Fonte: Adaptado de <https://www.sosom.com.br/corda/violao/violao-walnut-two-folk-na-fishman-tagima>

## 1.5.8 Cordas de violão

### 1.5.8.1 Associação da linguagem musical à linguagem física

Nesta seção, apresentaremos as relações da linguagem musical com a linguagem física, tendo em mente que na música usamos linguagens que podem ser associadas a conceitos físicos, de acordo com as variações do som como vai se apresentar na Tabela 1.

**Tabela 1:** Relação da linguagem musical com a linguagem física

<b>Relação da linguagem musical com a linguagem física</b>	
<b>Linguagem musical</b>	<b>Linguagem em termos de física</b>
Som brilhante	Associado a um aprimoramento dos agudos ou menos conteúdo de graves
Som vintage	Som antigo
Som quente	É um som com muito pouco amortecimento das baixas frequências. Essa ênfase nos graves está presente na composição de todas as notas, inclusive nas frequências médias e altas. Muitas vezes é percebido como um som muito "encorpado"; de fato, pode lembrar a solidez e a firmeza naturais da madeira, evocando adjetivos relacionados, como "amadeirado" ou "lenhoso".
Sustentação	A quantidade de tempo que a ressonância audível de uma nota é sustentada.

Fonte: Tylor, (2023).

### 1.5.8.2 Calibre

O calibre da corda, medido em polegada (in), normalmente varia de 0,008 para a primeira corda mais fina a 0,056 para a sexta corda mais grossa. Ao comparar o calibre das cordas da Violão, é comum ver classificações como a gente vê na seguinte tabela:

**Tabela 2:** Descrição do calibre das cordas de violão, medido em polegadas (in).

<b>Calibre</b>						
	<b>Corda 1</b>	<b>Corda 2</b>	<b>Corda 3</b>	<b>Corda 4</b>	<b>Corda 5</b>	<b>Corda 6</b>
	<b>(Mi-“e”)</b>	<b>(Si-“B”)</b>	<b>(Sol-“G”)</b>	<b>(Re-“D”)</b>	<b>(La-“A”)</b>	<b>(Mi-“E”)</b>
	<b>Polegada (in)</b>					
<b>Extra leve</b>	0,009	0,011	0,016	0,024	0,032	0,042
<b>Leve</b>	0,010	0,013	0,017	0,026	0,036	0,046
<b>Médio</b>	0,011	0,015	0,018	0,026	0,036	0,050

Fonte: E Home Recording Studio, (2022)

Para simplificar um pouco as coisas, as pessoas geralmente se referem a todo o conjunto de cordas pelo medidor de cordas 6th (Mi-“E”). Seguindo o exemplo acima, as cordas médias seriam 0,11 ou 011.

Com cordas de violão clássico, é um pouco diferente. Embora eles também carreguem um medidor específico, o medidor não é tão importante quanto a tensão da corda. As 3 opções de tensão padrão são alta, média e baixa.

Há uma diferença entre cordas grossas e finas, e cada uma delas é usada para tocar diferentes tipos de música. mostrara seguir estão apresentadas a diferença entre cordas grossas e cordas finas.

- ❖ Calibres de cordas grossas são geralmente melhores para:
  - Violonistas que tocam com muito dedilhar – porque duram mais, ter mais sustentação e quebram menos.
  - Violonistas que tocam sliders/mudam de tom – porque eles se esforçam mais.
  - Violões de baixa ação/altura – porque têm vibrações mais fortes, por isso são mais resistentes ao atrito.
  - Violonistas que tocam acústico sem amplificação – porque soam mais alto.
  - Jazz – porque nesse estilo a técnica de flexão não é muito utilizada.
  
- ❖ Calibres de cordas finas são geralmente melhores para:
  - Músicos iniciantes – porque é mais fácil brincar e ainda não se desenvolveu a força da mão ou calos nos dedos.
  - Blues/Solos – porque com cordas finas é mais fácil dobrar.
  - Violões vintage – porque colocam menos estresse no braço.

- Violões de corpo pequeno – porque elas soam melhor.
- Fingerpicking – porque eles respondem melhor ao dedilhado.

Muitos fabricantes também vendem um “medidor híbrido” conhecido como leve-médio, que carrega um medidor menor nas cordas “G”, “B”, “e” e um medidor mais pesado nas cordas “E”, “A” e “D”. Este medidor é destinado a violonistas que alternam tocando com os dedos e com a palheta (E Home Recording Studio, 2022).

### 1.5.8.3 *Metal*

- As cordas da Violão elétrica são feitas principalmente de 3 metais:
  - Aço niquelado – Fornece uma boa combinação de calor e brilho, um forte ataque quando dedilhado, e é a escolha mais popular de todas.
  - Pure Níquel - que é mais quente que o aço niquelado e tem um som vintage clássico.
  - Aço Inoxidável – que é mais resistente à corrosão, menos propenso ao ruído dos dedos quando desliza pelas cordas e tem uma boa combinação de brilho e sustentação.

Outros metais menos comuns para cordas de Violão elétrica incluem titânio, cobalto, cromo e cobre.

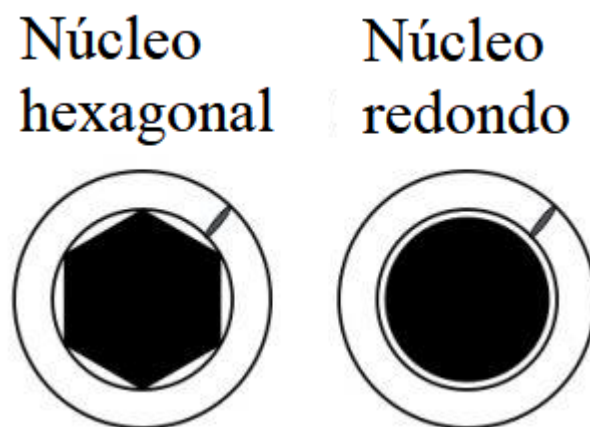
- Para cordas de violão acústico, as 3 opções mais populares são:
  - 80/20 Bronze (ou Latão) – que é 80% cobre/20% zinco, e é a escolha mais popular. Tem um som brilhante e claro, mas perde um pouco do brilho quando você toca por algumas horas, pois o metal corrói rapidamente.
  - Bronze Fósforo – que é semelhante ao bronze 80/20, mas é adicionado fósforo para evitar a oxidação e aumentar a vida útil das cordas. Em compensação, perde um pouco do brilho em relação às cordas de bronze 80/20.
  - Silk and Steel (Seda e Aço) – que são mais flexíveis e menos tensos, dando um som mais suave e macio. Eles são geralmente conhecidos como um híbrido entre as cordas de metal tradicionais e as cordas de nylon das Violões clássicas ou espanholas.
- Para Violões clássicos, os materiais mais comuns são:
  - Catgut – derivado do intestino de ovelhas e outros animais de fazenda (NÃO gatos). Embora muito menos seja usado hoje, até 1940 todas as cordas eram feitas de catgut.

- Nylon – que é o material que acabou substituindo o catgut, pois era mais barato e mais fácil de produzir em massa. Os tipos mais comuns de náilon são: náilon retificado, náilon preto e náilon compósito, embora o mais popular seja o náilon transparente, devido ao seu brilho e clareza.
  - Silver-Clad Copper (também conhecido como “cordas de prata”) – que é o que envolve o núcleo de nylon das cordas do baixo e é o metal mais popular para esse fim devido ao seu tom quente e rico.
  - Bronze 80/20 (também conhecido como “cordas de ouro”) – Muitos violonistas preferem este ao invés do cobre prateado, devido ao seu brilho e projeção.
- (E Home Recording Studio, 2022).

#### 1.5.8.4 Núcleo das cordas

Sob o enrolamento externo das cordas graves (E6, A5, D4 e às vezes G3), existe um núcleo com um cabo que vem em 2 formatos, A Figura 17 contém um desenho esquemático de um ponto de vista transversal. Esta parte refere-se apenas a Violão elétrica e acústica não clássica. Pode ser visto que existem dois tipos de núcleos ou “alma” o hexagonal e o redondo.

**Figura 17.** Imagem de um ponto de vista transversal. (Esta parte refere-se apenas a Violão elétrica e acústica).



Fonte: Adaptado de E Home Recording Studio, (2022)

- núcleo redondo
- núcleo hexagonal

No início todas as cordas tinham alma redonda, depois que uma empresa fez a primeira alma hexagonal, todas as outras empresas passaram a fazê-las da mesma forma, as arestas

afiadas dos núcleos hexagonais agarraram bem o cabo exterior., evitando assim que escorregassem e fizessem bobinagem da máquina mais precisa e consistente.

Essa é a razão pela qual é muito mais comum hoje que as cordas de núcleo redondo sejam montadas à mão.

Agora, vamos ver então as diferenças entre os dois núcleos em termos de desempenho (E Home Recording Studio, 2022):

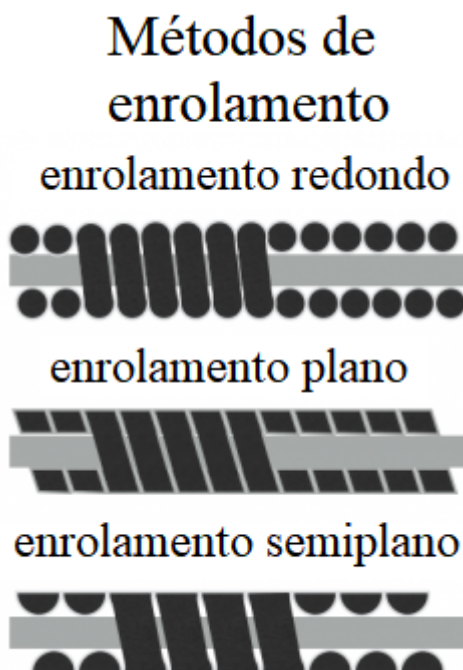
**Tabela 3:** Diferenças entre os dois núcleos em termos de desempenho.

<b>Núcleo hexagonal</b>	<b>Núcleo Redondo</b>
Mais rígido	Mais flexível
Mais brilhante	Mais quente
Ataque mais forte	Ataque mais suave
Menos sustentação	Mais sustentação
Tom moderno	Tom vintage
Tom consistente	Tom inconsistente

Fonte: E Home Recording Studio, (2022)

#### 1.5.8.5 Enrolamento

- O cabo que envolve o núcleo sólido pode ser de 3 tipos:
  - Enrolado redondo: que utiliza um fio redondo para criar um barbante com superfície texturizada (como mostra a Figura 18).
  - Enrolado plano: que usa um cabo plano para criar uma corda com uma superfície lisa.
  - Enrolado semi-plano: que é um híbrido das duas anteriores. Usando técnicas como polimento mecânico ou rolos de compressão, o cabo redondo é parcialmente, mas não completamente, achatado (E Home Recording Studio, 2022).

**Figura 18.** Diferentes enrolados que tem as cordas

Fonte: Adaptado de (E Home Recording Studio, 2022)

A Enrolado redondo é a mais popular das 3 de longe. Eles também são as cordas mais baratas, com uma ampla seleção para escolher. Enrolado plano é a segunda opção mais popular, mas as cordas costumam ser mais caras. Estas são as diferenças entre a Enrolado redondo e plana em termos de desempenho (E Home Recording Studio, 2022):

**Tabela 4:** as diferenças entre a Enrolado redondo e plana em termos de desempenho.

<b>Enrolado redondo</b>	<b>Enrolado plano</b>
Vida mais curta	Vida longa
Som mais claro	Som mais quente
Mais sustentação	Sustentação mais curta
Mais ruído de Corda	Menos ruído de corda
Mais desgaste	Menos desgaste
Tensão mais baixa	Maior tensão
Mais harmônicos superiores	Menos harmônicos superiores
Mais aderência para dobrar/depenar	Menos aderência para dobrar/depenar
Melhor para o Rock n Roll	Melhor para o Jazz

Fonte: (E Home Recording Studio, 2022)

#### 1.5.8.6 *Revestimento*

Para a revolução das cordas de violão no ano de 1997, a empresa Elixir® Strings iniciou um novo conceito, cordas revestidas, eles criaram um polímero ultrafino para proteger o metal de substâncias que poderiam danificar como óleo, suor, sujeira, pele e meio ambiente, como resultado desses revestimentos, descobriram que as cordas revestidas tinham uma duração maior do que as cordas não revestidas, tinham um toque mais suave e chiavam menos; mas nem todos os músicos ficaram satisfeitos com este novo conceito, alguns críticos de cordas revestidas comentaram que com o revestimento as cordas perdem brilho e som, indiferentes que alguns músicos não gostassem deste novo conceito, outras marcas reconhecidas também começaram a criar os seus próprios revestimentos (todos esses tipos de revestimentos são patentes com direitos para que outras empresas não copiem essa tecnologia), embora muitas empresas tenham decidido seguir o caminho da empresa Elixir, as cordas revestidas mais reconhecidas são da Elixir, tanto que possuem 3 tipos de revestimentos, Optiweb, Nanoweb e Polyweb, o processo é imersão das cordas numa solução que contenha o material de revestimento e seguida de secagem das cordas. A diferença entre eles é que o primeiro é um revestimento mais fino, o que torna o som mais semelhante ao das cordas sem revestimento, os revestimentos seguintes são ligeiramente mais espessos e, por conseguinte, o som das cordas muda, o revestimento mais espesso confere às cordas uma maior durabilidade. (E Home Recording Studio, 2022).

#### 1.5.9 **Origem do som**

O som é um fenômeno físico que tem sua origem no movimento repetido de um corpo, que chamamos de vibrações. Essas vibrações produzem ondas sonoras que se propagam por um meio (no nosso caso, o ar) e chegam ao ouvido humano, onde são transformadas em ondas mecânicas, pois quando as ondas sonoras chegam com potência suficiente entram em ressonância com o tímpano que, com a vibração dos ossos do ouvido médio, são transformadas em impulsos elétricos que atingem o nervo auditivo e são enviados ao córtex cerebral, onde são

convertidos no cérebro em som. Para que tudo isso aconteça, temos três elementos fundamentais: emissor, transmissor e receptor (Fletcher; Rossing, 2012).

#### *1.5.9.1 Parâmetros de som*

Os sons e sua fonte emissora têm características que geralmente são usadas para identificar, analisar e diferenciar sons. Definimos essas características como parâmetros sonoros, que podem ser descritos da seguinte forma:

- O tom: refere-se à frequência de vibração do som.
- Intensidade: refere-se à força com a qual o som é produzido e é independente do tom.
- O timbre: é a qualidade e a quantidade de vibração de um som, que permite diferenciar dois sons iguais produzidos por fontes diferentes. É determinada pelos harmônicos que acompanham a frequência fundamental quando ela é posta a vibrar, gerando diferentes variações de amplitude na onda senoidal básica ou fundamental.
- duração: é o espaço temporal ocupado por um som, que na música é expresso por meio de figuras musicais.

O tom, intensidade e o timbre são qualidades dependem diretamente das características do emissor (Fletcher; Rossing, 2012).

#### *1.5.9.2 Espectro audível e audiofrequências*

Por frequências de áudio, queremos dizer todas as frequências que podem ser percebidas e processadas pelo ouvido humano, ou seja, toda a faixa de frequências sonoras que compõem o espectro audível. Em geral, a faixa varia entre 20 Hz e 20000 Hz; tudo o que está abaixo e acima dessa faixa não é percebido pelo ouvido humano e é definido como infrassom e ultrassom. Os infrassons são ondas sonoras que estão abaixo de 20 Hz, ou seja, sua vibração é lenta, têm baixa frequência, são sons graves; os ultrassons são ondas com frequências de vibração acima de 20.000 Hz, têm vibração rápida, com alta frequência, produzindo sons muito agudos. (Fletcher; Rossing, 2012).

O espectro audível foi dividido em faixas de tons, a fim de classificar os diferentes sons, sendo os graves: frequências entre 16-250Hz, os médios: frequências entre 250-2000Hz e os agudos: frequências entre 2000-20000Hz. Além dessa classificação, foi decidido que os sons (tons) essenciais que definimos como notas musicais e que são conhecidos como um total de 12 (DO, DO#/REb, RE, RE#/Mib, MI, FA, FA#/SOLb, SOL, SOL#/LAb, LA, LA#/SIb, SI). Essas notas são repetidas em diferentes frequências em todo o espectro sonoro, ou seja, o mesmo tom é repetido com o dobro ou a metade de seu valor original, ou seja, todas as notas têm contrapartes diferentes em diferentes registros (tons) mais baixos ou mais altos. Essas notas foram definidas como oitavas. A distância entre uma nota e outra foi definida como um intervalo de semitom, portanto, da nota Dó à nota Dó# há um semitom e assim por diante até a nota Si, depois da qual retornamos à nota Dó, mas com o dobro de sua frequência, ou seja, uma oitava acima (Fletcher; Rossing, 2012). Para ter uma ideia melhor, vou lhe mostrar na

Tabela 5 de frequências musicais por oitava.

**Tabela 5.** Tabela de frequências por oitava

Nota	Octava 0	Octava 1	Octava 2	Octava 3	Octava 4	Octava 5	Octava 6	Octava 7	Octava 8	Octava 9	Octava 10
DO	16,3516	32,7032	65,4064	130,8128	261,6256	523,2512	1046,5024	2093,0048	4186,0096	8372,0192	16744,0384
DO#/REb	17,3239	34,6478	69,2956	138,5912	277,1824	554,3648	1108,7296	2217,4592	4434,9184	8869,8368	17739,6736
RE	18,3541	36,7082	73,4164	146,8328	293,6656	587,3312	1174,6624	2349,3248	4698,6496	9397,2992	18794,5984
RE#/Mib	19,4454	38,8908	77,7816	155,5632	311,1264	622,2528	1244,5056	2489,0112	4978,0224	9956,0448	19912,0896
MI	20,6017	41,2034	82,4068	164,8136	329,6272	659,2544	1318,5088	2637,0176	5274,0352	10548,0704	21096,1408
FA	21,8268	43,6536	87,3072	174,6144	349,2288	698,4576	1396,9152	2793,8304	5587,6608	11175,3216	22350,6432
FA#/SOLb	23,1247	46,2494	92,4988	184,9976	369,9952	739,9904	1479,9808	2959,9616	5919,9232	11839,8464	23679,6928
SOL	24,4997	48,9994	97,9988	195,9976	391,9952	783,9904	1567,9808	3135,9616	6271,9232	12543,8464	25087,6928
SOL#/LAb	25,9565	51,9130	103,8260	207,6520	415,3040	830,6080	1661,2160	3322,4320	6644,8640	13289,7280	26579,4560
LA	27,5000	55,0000	110,0000	220,0000	440,0000	880,0000	1760,0000	3520,0000	7040,0000	14080,0000	28160,0000
LA#/SIb	29,1353	58,2706	116,5412	233,0824	466,1648	932,3296	1864,6592	3729,3184	7458,6368	14917,2736	29834,5472
SI	30,8677	61,7354	123,4708	246,9416	493,8832	987,7664	1975,5328	3951,0656	7902,1312	15804,2624	31608,5248

Fonte: Adaptado de <https://parabajoelectrico.com/frecuencia-notas-musicales/>

Na

Tabela 5, temos a divisão das frequências do espectro auditivo da oitava 0 à oitava 10, onde se pode ver que as frequências (ou tonalidades) das 12 notas que são estabelecidas na escala auditiva, ocupando o total do espectro. Na tabela 6 também pode ser observado que existem algumas frequências que possuem cor vermelha, essas são as frequências fundamentais para as cordas do violão quando são tocadas no ar, para melhor observá-las elas serão mostradas na Tabela 6, onde são apresentadas de acordo com isso já podemos identificar quais serão as

frequências que podem ser observadas quando a análise tonal for realizada (Fletcher; Rossing, 2012).

**Tabela 6.** frequências fundamentais para as cordas do violão quando são tocadas no ar

Notas no ar	Hz
1ra (e)	329.63
2da (B)	246.94
3ra (G)	196.00
4ta (D)	146.83
5ta (A)	110.00
6ta (E)	82.41

Fonte: Adaptado de <https://www.guitarfiero.com/2013/02/las-frecuencias-de-las-cuerdas-de-la.html>

## 1.6 ALERGIAS POR NÍQUEL

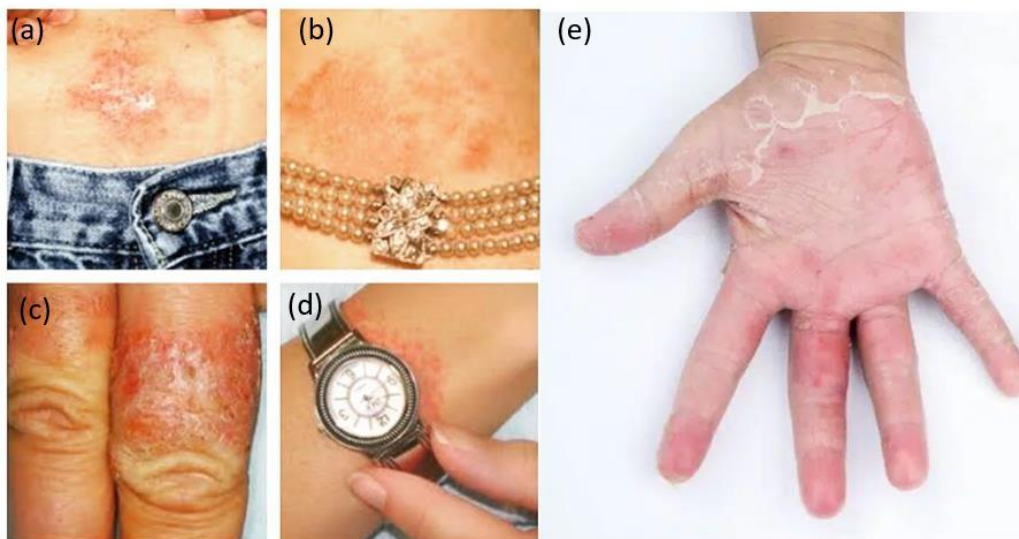
Na medicina atual, para tratar alguns procedimentos médicos, utilizam-se metais para realizar implantes cirúrgicos, estes na maioria dos casos não causam problemas médicos, mas sempre ocorrem algumas variações, isso porque os sistemas do corpo podem ter complicações, em alguns casos os problemas podem ser reações de hipersensibilidade, essas reações podem ser um pouco tardias, pois os corpos não atacam diretamente os implantes, a maioria dessas reações podem ser vistas inicialmente como dermatite alérgica, mas existem outros sintomas que podem aparecer devido ao uso de metais nessas implantes (Baumann; Crist, 2020).

Um dos padrões mais frequentes de alergia ao níquel é por contato, em crianças pequenas observa-se que a ingestão de níquel por via oral pode produzir outros tipos de sintomas, incluindo dor abdominal, diarreia, constipação, náusea ou vômito. Já a associação de sintomas gastrointestinais está associada à Síndrome de Alergia Sistêmica ao Níquel (SNAS). Em alguns casos esses sintomas gastrointestinais são devidos a altas doses de níquel em alguns alimentos, isso afeta consideravelmente a qualidade de vida das pessoas, uma das formas de tratar esse tipo de sintomas e doenças é seguir uma dieta livre de consumo de níquel para evitar estes possíveis passos sintomas (Mori *et al.*, 2021).

Das alergias mais comuns ao níquel, é descrita pela dermatite alérgica, que afeta até 17% das mulheres e 3% dos homens, na maioria dos casos está relacionada ao uso de joias ou

brincos, essa dermatite começa entre os primeiros 12 a 48 horas de contato e os metais mais comuns que os produzem são níquel, cobalto ou cromo, os sintomas mais vistos são erupções cutâneas, coceira, vermelhidão e ressecamento. Por outro lado, foi demonstrado que há proliferação de células inflamatórias em pacientes que tiveram inserção de stent coronariano, por isso foi definido como padrão testar todos os pacientes quanto a metais antes da colocação de stents intracranianos. Esses dispositivos corroem e liberam íons metálicos no sangue e, por conta disso, pode ocorrer rejeição no organismo, pois causam reações imunológicas (Tonetti *et al.*, 2018). **A Erro! Fonte de referência não encontrada.** 19 contém uma imagem de relato de alergia de contato por Níquel em regiões mais comuns são abdome(a), Pescoço (b), dedos(c), pulso(d) e mão (e).

**Figura 19.** Imagem de relato de alergia de contato por Níquel em regiões mais comuns são abdômen(a), Pescoço (b), dedos(c), pulso(d) e mão (e)



Fonte: Adaptado de- <http://nutrimari.blogspot.com/2016/>

## 2 OBJETIVO GERAL

Este estudo visa a preparação e caracterização de revestimentos de Diamond-Like Carbon (DLC) em diferentes tipos de cordas de Violão elétrica, incluindo aço niquelado, níquel puro e aço inoxidável, utilizando o método de deposição química na fase vapor assistida por plasma (PECVD). O objetivo principal é proteger as cordas da ação de substâncias nocivas, como suor a fim de avaliar sua durabilidade, resistência e qualidade sonora.

### 2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Produzir revestimentos de DLC pelo método PECVD em cordas de metal para violão de diferentes espessuras (afinação).
- Estudar da influência dos parâmetros de revestimento DLC em cordas de Violão elétrica nas propriedades do espectro sonoro, corrosão e durabilidade.
- Caracterização dos revestimentos por microscopia eletrônica de varredura/eletroscopia de energia dispersiva (MEV/EDX), espectroscopia de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES), espectrofotometria de fluorescência (XRF), espectroscopia Raman, e avaliação da corrosão em meio de suor sintético em função da perda de massa das cordas.
- Estudo dos parâmetros de tonalidade das cordas com e sem revestimento de DLC.

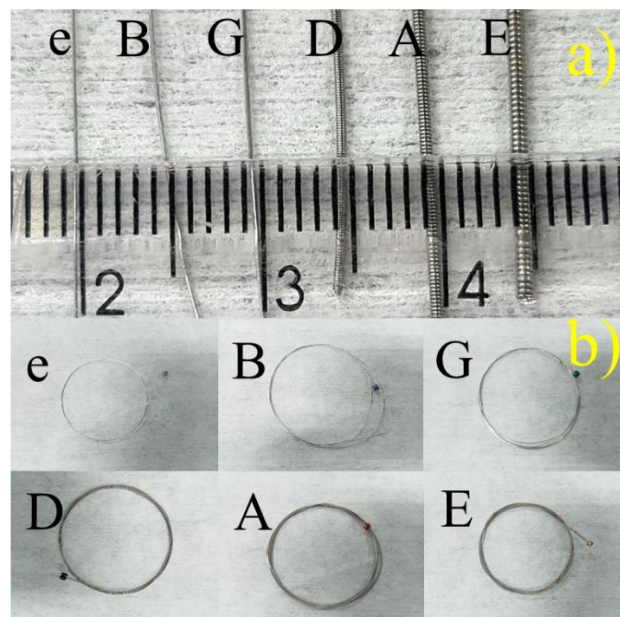
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS

##### 3.1.1 Cordas de Violão

As cordas de Violão elétrica que são utilizadas para esta pesquisa são um conjunto de 6 cordas vendidas como níquel puro, tipo bitola leve com espessuras que variam de 0,010 (“e”) a 0,046 (“E”) da marca de cordas SG fabricadas no Brasil, com material de níquel importado dos Estados Unidos e maquinário Italiano, pode ser visto na fotografia da imagem da Figura 20.

**Figura 20.** Cordas de violão e seus diferentes formatos e calibres, a) o calibre de cada uma é apresentado. b) as cordas completas são apresentadas. 1<sup>a</sup> (e), 2<sup>a</sup> (B), 3<sup>a</sup> (G), 4<sup>a</sup> (D), 5<sup>a</sup> (A), 6<sup>a</sup> (E).



Fonte: Autor.

### 3.1.2 Produtos químicos e reagentes utilizados no processo de deposição dos revestimentos

Todos os produtos químicos utilizados nesta pesquisa foram obtidos localmente, na cidade de São José dos Campos, estado de São Paulo, Brasil, fornecidos principalmente pela Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP), entre eles estão os gases utilizados no reator PEVCD, como os produtos químicos para fazer suor sintético para testes.

- Álcool.
- Argônio (Ar)
- Silano (SiH<sub>4</sub>)
- Acetileno (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)
- Acetona.
- Água destilada.
- Cloreto de sódio (NaCl).
- L (+) Ácido láctico (90%) (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O<sub>3</sub>).
- Ureia (CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>O).
- Hidróxido de Sódio (NaOH)

#### 3.1.2.1 Preparação do suor sintético

O suor sintético foi formulado com o intuito de reproduzir as condições ambientais que frequentemente afetam as cordas de violão. Essas cordas estão sujeitas a uma série de variáveis ambientais, como poeira, óleo e suor, todos os quais desempenham um papel significativo na alteração do timbre, durabilidade e qualidade do som das cordas. Embora seja impossível replicar completamente todos os fatores que afetam as cordas do violão, a utilização de suor sintético juntamente com a manutenção de condições estáveis em um forno a 37°C permite um controle razoável para observar como as cordas reagem ao longo do tempo. A formulação do suor sintético segue as diretrizes estabelecidas na norma BS EN 1811 (Instituto de Normas Britânico, 2008), que define os parâmetros químicos que podem estar presentes no suor humano. A composição do suor sintético é a seguinte:

A solução de teste consiste em água deionizada contendo:

- cloreto de sódio 0,5% (m/m);
- 0,1% (m/m) de ácido láctico;
- 0,1% (m/m) de ureia;
- Solução de hidróxido de sódio 1 M e 0,1 M

Para a preparação do suor sintético, 900 ml de água deionizada foram colocados em um béquer de 1000 ml. Em seguida, foi adicionado  $1,00 \pm 0,01$  g de ureia, seguido de cloreto de sódio em uma proporção de  $5,00 \pm 0,05$  g, e por fim, foi adicionado ácido láctico em  $1,00 \pm 0,01$  g. Uma vez obtida essa solução, iniciou-se a agitação até que todos os elementos estivessem dissolvidos na água.

O eletrodo de pH foi utilizado na solução de teste e o valor do pH foi aferido e com uso de hidróxido de sódio 0,1 M gota a gota até atingir um pH de  $5,5 \pm 0,05$ . inicial e foi ajustado até atingir um pH de  $6,5 \pm 0,05$ , alcançado e mantido de forma estável.

O valor do pH foi aferido após 10 min da última adição de hidróxido de sódio 0,1 M para garantir que o pH esteja na faixa de  $6,5 \pm 0,05$ .

A solução foi transferida para balão volumétrico de 1000 mL e o volume foi completado com água deionizada. Antes de usar, certificou-se de que o pH da solução de teste estava na faixa de pH  $6,5 \pm 0,05$ .

Obs.: Sendo necessário reduzir o pH da solução para  $6,5 \pm 0,05$  antes do teste, isso deve ser feito adicionando lenta e suavemente com agitação contínua gota a gota um volume de ácido clorídrico 0,1 M.

## **3.2 MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO**

### **3.2.3 Caracterização das cordas sem e com revestimento**

As cordas do violão são preparadas para caracterização realizando uma limpeza considerável com álcool e acetona para remover qualquer sujeira e graxa que possam ter após extraí-las da embalagem original; após realizar esta limpeza, são realizados estudos de Elemento químico, morfologia, tonalidade.

### 3.2.4 Técnicas de caracterização

#### 3.2.4.1 Morfologia e estequiometria química

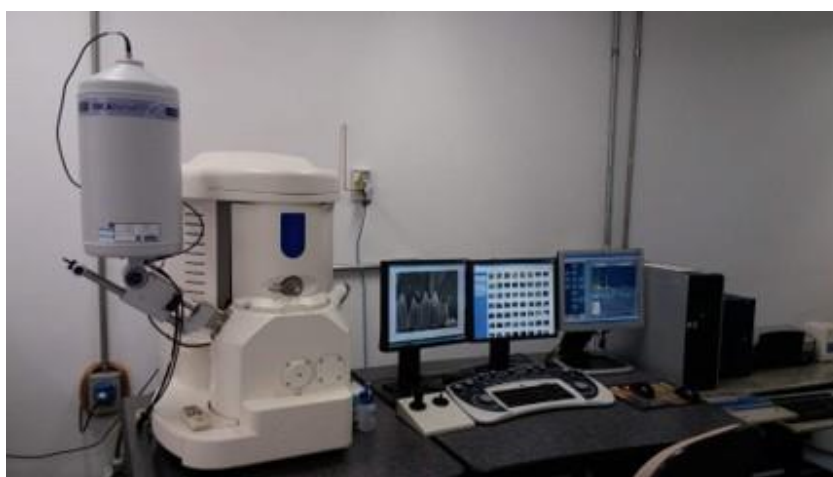
A morfologia das cordas foi analisada com imagens de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca Carl Zeiss, modelo: MA 10 + EDX INCA Oxford, Uma fotografia do equipamento esta apresentado na Figura 21, com o qual foram produzidas imagens de alta resolução da superfície das cordas, tanto morfológicas e topográfica, este equipamento trabalha com um filamento de tungstênio (W) max.30 kv no modo de elétron secundário e em uma faixa de ampliações de 50.000x, uma faixa de tensão de aceleração de 5 – 30 kv. Com o mesmo equipamento, será realizada a análise química quantitativa dos elementos, pois possui um detector de raios X que permite a análise elementar por EDX (espectrometria por energia dispersiva de raios X). O EDX permite análises qualitativas e semiquantitativas rápidas com os padrões apropriados.

O equipamento MEV é basicamente uma coluna optoeletrônica, é um feixe de elétrons gerado por um filamento incandescente já acelerado por uma grade polarizada positivamente próxima, o feixe tende a se separar devido a repulsões eletrostáticas entre suas partículas, então a coluna possui um campo elétrico gerado por placas, que é responsável por focalizar o feixe, onde o campo elétrico funciona como uma lente óptica, para condensar o feixe e direcioná-lo para um ponto da amostra. Devido à interação do feixe de elétrons com a amostra, ocorrem processos de perda de energia, dentre os quais estão a geração de elétrons secundários, elétrons Auger, raios X por radiação de frenagem e a produção de radiação eletromagnética por transições eletrônicas. A energia dos elétrons secundários é inferior a 100 eV e seu desempenho é alto, ou seja, para cada elétron incidente na amostra, vários elétrons secundários são produzidos, sendo este último o que normalmente é utilizado dentro da câmera para a formação da imagem (Albella, 2003).

As imagens MEV são chamadas de micrografias, estas são produzidas pela varredura do feixe de elétrons sobre a amostra, uma das características relevantes é que essas imagens podem variar dependendo do material que está sendo bombardeado, quando este material possui maior número atômico, a emissão será maior. O outro fator que depende é a rugosidade do material, pois há concentrações de carga nesses pontos, conforme a topografia mostra (Albella, 2003).

No mesmo equipamento podem ser realizadas medições de EDX onde o mais importante é que as composições químicas podem ser obtidas "in situ" das amostras que são expostas (Albella, 2003). Essa técnica é realizada devido aos raios X provenientes dos pontos da superfície da amostra por onde passa o feixe de elétrons, pois a energia espalhada dos raios X ser característica de cada elemento químico, e fornecer informações analíticas qualitativas e quantitativas da área selecionada na superfície da amostra (Martín, 1993). No caso em que a radiação é proveniente das camadas internas K e L dos átomos, obtém-se a radiação característica de cada elemento no volume analisado, porém, a identificação de elementos leves é difícil, pois requer transições eletrônicas entre as camadas internas e externas. A radiação de camadas internas requer número atômico consideravelmente alto. No caso da técnica EDX, o feixe de elétrons pode ser energético o suficiente para ionizar os átomos e assim extrair um elétron da camada interna K, gerando uma vacância nesse nível de energia, assim o átomo adquire um estado excitado, como a natureza deseja. Para estar em equilíbrio, leva a uma de excitação e com ela a emissão de um fóton (fluorescência) ou de um elétron (Auger), devido à energia liberada pela transição de elétrons das camadas externas ao ocupar a vacância gerada, se resultar a emissão de fótons corresponde aos raios X, que podem fornecer informações sobre o elemento contido na amostra (Albella, 2003).

**Figura 21.** Microscópio eletrônico de varredura – MEV.

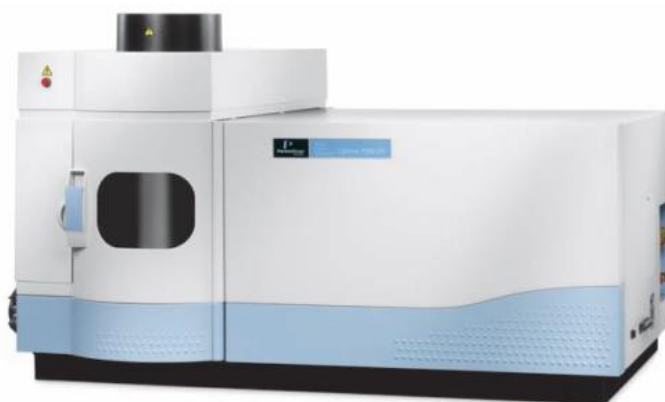


Fonte: Univap – Instituto de pesquisa & desenvolvimento

### 3.2.4.2 Espectroscopia de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES)

A espectroscopia de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) modelo Optima 7300 DV da Perkin Elmer Ca (EUA) foi usada para determinar a composição elementar de amostras líquidas. Uma fotografia do equipamento está apresentada na Figura 22. As análises foram feitas medindo-se as linhas de emissão óptica de átomos excitados em um plasma dependente da emissão espontânea de fótons gerados a partir de íons ou átomos, e esses íons e átomos excitados por uma descarga de radiofrequência (Majumdar; Dubey, 2017). Essas medições foram realizadas nas instalações da "Quimlab" na cidade de Jacareí. As amostras foram atomizadas e ionizadas em plasma de argônio por meio de um sistema de injeção, fazendo com que fossem excitadas. Os íons e átomos liberavam fótons definidos como emissão iônica ou atômica, registrados em um detector óptico Echelle ou Rowland, que separava os diferentes comprimentos de onda. Ao medir as intensidades de emissão e os respectivos comprimentos de onda, a diferença de energia entre o estado excitado e o estado fundamental foi determinada. Esse sinal do emissor representava a proporção de abundância desse elemento no plasma, tornando-o uma técnica multi-elementar para a análise inorgânica de várias amostras. Para dissolver 0,1 g das cordas, foi usada uma placa quente e 3 mL de HCl a 36%. A solução foi então combinada com 100 mL de água deionizada, que tinha uma condutividade maior que 18 M $\Omega$ . Por fim, o aerossol dessa solução foi usado para introduzir a solução de cordas no plasma.

**Figura 22.** Espectroscopia de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) modelo Optima 7300 DV da Perkin Elme



Fonte: Manual do equipamento

### 3.2.4.3 *Espectroscopia Raman*

As medidas de espectroscopia Raman foram conduzidas utilizando o espectrômetro Raman LabRam HR Evolution da Horiba, que opera com três comprimentos de onda de excitação, dependendo do laser utilizado: 323 nm, 514,5 nm e 633 nm. O equipamento utilizado está localizado nas instalações do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), conforme mostra a fotografia na Figura 23. Este microscópio confocal Raman é equipado com uma fonte laser monofásica de 50W, abrangendo uma faixa de comprimento de onda que varia de 200 nm a 2000 nm, e utiliza detectores CCD de canal único para uma melhor captura dos dados. A interação entre a luz e a matéria é fundamentada no conceito de que a energia dos fótons se comporta como onda. Do ponto de vista clássico, a interação ocorre de acordo com as leis da mecânica das ondas. No entanto, a mecânica quântica apresenta o conceito de intensidade como a contagem de fótons interagindo. Isso permite considerar as transições que ocorrem entre os níveis de vibração de moléculas ou sólidos. É importante ter em mente a dissipação de energia que ocorre quando a luz interage com a matéria. No contexto da espectroscopia Raman, é essencial compreender a interação entre um feixe de laser e a amostra. Quando um laser incide sobre um sólido, ele provoca variações vibracionais na rede cristalina. Isso pode ser comparado à vibração de uma corda, com seus modos normais característicos. No entanto, a dispersão de energia nessa onda vibracional não é linear, uma vez que a rede cristalina consiste em átomos diferentes, cada um vibrando de maneira distinta devido à quantidade de energia absorvida pelo feixe de laser incidente. Nesse cenário, ocorre o fenômeno conhecido como espalhamento Raman, que envolve a interação entre fótons e fônons. O desvio da luz do laser fornece informações valiosas sobre os modos vibracionais da rede cristalina, que são resultado do movimento dos fônons. Quando a rede cristalina é excitada e começa a vibrar em um modo específico, é chamado de espalhamento Raman Stokes. Por outro lado, quando a rede é excitada e vibra em modos de maior energia, é denominado espalhamento Raman Anti-Stokes. Esse fenômeno oferece insights importantes sobre as propriedades da amostra estudada.(LONG, 2002).

**Figura 23.** Espectrômetro Raman Horiba modelo LabRAM HR Evolution.



Fonte: Sítio Oficial INPE([http://www.las.inpe.br/projetos\\_e\\_pesquisas/dimare.php](http://www.las.inpe.br/projetos_e_pesquisas/dimare.php))

#### 3.2.4.4 Fluorescência de raios X (XRF)

As análises foram executadas nas amostras de cordas na forma de carbonatos e empregando a espectrofotometria de fluorescência de raios X (XRF) no equipamento Malvern Panalytical modelo Epsilon 3, São Paulo, Brasil, localizado nas instalações da Quimlab na cidade de Jacareí. O tubo de raios X de metal-cerâmica garante resultados confiáveis e de alta qualidade. Ajustes flexíveis de tensão de 4,0 a 50 kV e uma corrente máxima de até 3,0 mA foram usados para definir condições de excitação específicas da aplicação que otimizam o desempenho em toda a tabela periódica. O detector eletrônico permite uma capacidade de taxa de contagem linear de mais de 1.500.000 cps (com 50% de tempo morto) e uma resolução independente da taxa de contagem tipicamente melhor que 135 eV para uma melhor separação das linhas analíticas no espectro.

Para essa análise, as cordas foram preparadas da seguinte forma: aproximadamente 0,1g de amostras foram dissolvidas em 10 mL de ácido clorídrico em banho maria a 100°C. Após isso adicionou-se solução de carbonato de sódio 20% até pH alcalino para precipitação dos metais da amostra na forma de carbonatos. A amostra foi centrifugada a 1500 rpm e o precipitado de carbonatos metálicos analisado no XRF-EDX

Os fótons de raios X podem interagir com os átomos de várias maneiras, uma delas pelo efeito fotoelétrico, no qual a luz de uma determinada frequência, chamada de frequência limiar, pode liberar elétrons de uma superfície metálica, esses elétrons são chamados de

fotoelétrons. A explicação se baseia na teoria quântica da luz, na qual se propõe que a luz não é uma onda, mas é composta de partículas chamadas fótons, que têm uma energia proporcional à sua frequência, portanto, quando um fóton atinge uma superfície metálica, ele pode transferir sua energia para um elétron na superfície. Se a energia do fóton for maior do que a energia de ligação do elétron, o elétron será liberado da superfície e, por sua vez, esses elétrons podem se deslocar, criando uma corrente elétrica (Potts; Webb, 1992).

**Espalhamento Rayleigh:** A interação entre os raios X do tubo primário e a amostra faz com que uma pequena fração dos fótons de raios X incidentes seja liberada da amostra sem alteração de energia. O espalhamento Rayleigh da radiação contínua é característica do tubo é, portanto, sobreposto ao espectro de fluorescência observado, causando um aumento nos fundos observados e possíveis interferências sobrepostas entre o tubo espalhado e as linhas de fluorescência (Potts; Webb, 1992).

**Espalhamento Compton:** Uma segunda forma de interação faz com que uma pequena fração do espectro do tubo seja emitida pela amostra com energias de raios X deslocadas para valores mais baixos. A magnitude da mudança de energia nesse espectro de espalhamento Compton depende do ângulo de espalhamento. Na verdade, a geometria tubo-amostra-espectrômetro geralmente é projetada em cerca de  $90^\circ$  porque a intensidade de espalhamento Compton atinge um mínimo nesse ângulo. Assim como o espalhamento Rayleigh, o espalhamento Compton também contribui para as intensidades de fundo nos espectros de fluorescência. Entretanto, o espalhamento de uma linha tubular característica resulta em um pico adicional de "espalhamento Compton" deslocado para uma energia mais baixa em comparação com a linha de espalhamento Rayleigh. Os picos de espalhamento Rayleigh e Compton podem ser suprimidos com a colocação de um filtro de alumínio ou cobre entre o tubo e a amostra. Esse filtro deve ser espesso o suficiente para atenuar as linhas características do tubo, mas ainda transmitir o bremsstrahlung do tubo de energia mais alta para permitir a excitação das amostras. No entanto, devido à intensidade reduzida do espectro do tubo que atinge a amostra, as sensibilidades elementares geralmente são reduzidas. Consequentemente, os filtros de feixe primário normalmente só são usados na espectrometria WD-XRF em circunstâncias específicas, por exemplo, na determinação de Mn ou Cr usando um tubo de raios X com ânodo de Cr ou de Nb usando um tubo com ânodo de Me, em que as interferências espectrais das linhas dispersas de Rayleigh ou Compton do tubo seriam inaceitavelmente graves. Os filtros de feixe primário têm benefícios adicionais na ED-XRF, conforme discutido abaixo. Os elétrons energéticos induzem a ionização dos elétrons orbitais da concha interna,

resultando em fluorescência de raios X das linhas características do alvo. Entretanto, os elétrons primários também são desacelerados pela interação com os elétrons orbitais externos dos átomos do alvo, resultando na emissão de um espectro contínuo de radiação de raios X (o efeito bremsstrahlung) que se estende da energia zero até o equivalente ao potencial aplicado. É evidente que todos os fótons de raios X (contínuos e característicos) com uma energia que excede o limiar da borda de absorção correspondente são capazes de induzir a fluorescência de raios X. De fato, a energia das linhas características no tubo de raios X é muito baixa. De fato, a energia das linhas características do tubo (e, portanto, a escolha do tubo) é uma consideração importante para otimizar a excitação dos elementos selecionados (Potts; Webb, 1992).

**Figura 24.** Espectrofotômetro XRF Panalytical modelo Epsilon 3.



Fonte: Manual do equipamento

#### 3.2.4.5 Corrosão

Na natureza, todos os materiais experimentam interação com outros materiais, podem estar em condições ambientais satisfatórias para serem estáveis ou podem estar em condições em que sua estabilidade não é controlada, como sabemos, a natureza sempre tenta estar com o menor gasto energético, e devido a isso e por conhecimento de química sabemos que os materiais nem sempre são puros, ou seja, é muito difícil encontrar elementos puros sem interações (a maioria destes são os gases nobres), pois conhecemos a lei do octeto apresentada por Gilbert Newton Lewis, onde os elementos puros que não estão em seu menor gasto energético fazem ligações com outros elementos, seja compartilhando ou cedendo elétrons, para ter seu menor gasto energético, de acordo com isso na natureza temos os metais que tendem em

certa medida a interação com partículas de oxigênio ou água, fazendo com que elas se deteriorem com o tempo, propriedades mecânicas, propriedades físicas ou aparência (Callister, 2000). Nesse sentido, a corrosão metálica pode ser definida como a interação química ou eletroquímica devido à exposição a uma determinada substância, esse processo geralmente produz liberação de energia e é devido à exposição desses metais a um meio que pode conter principalmente presença de moléculas de água, íons de oxigênio e hidrogênio. Neste caso, os materiais metálicos apresentam processos eletroquímicos realizando uma transferência de elétrons de um componente químico para outro, lembrando que os metais possuem uma grande nuvem de elétrons que podem passar facilmente de sua camada de valência para sua camada de condução aplicando pouca energia e carregando em lembrando que a atmosfera nem sempre está em equilíbrio, pois neste caso o metal cede elétrons para outras moléculas gerando oxidação, este conceito ocorre devido a relações de redução ou reações catódicas (Callister, 2000). As reações eletroquímicas consistem na soma de duas reações que são a reação de oxidação e a reação de redução, todos os materiais imersos em soluções iônicas na ausência de reações interferentes têm um potencial  $E$ , se por algum motivo (seja elétrico, mecânico ou químico) o são variadas as condições, é gerado um novo potencial  $E'$ , que pode ser maior ou menor que o anterior, a diferença entre eles é chamada de sobre potencial  $e$ , de acordo com isso, o equilíbrio termodinâmico; quando este fenômeno ocorre é chamado de polarização (Gentil, 1996).

Uma das formas de se obter medidas qualitativas e quantitativas de corrosão se dá por meio de medidas de curvas de polarização, de acordo com estas é possível descobrir que tipo de ataque corrosivo está ocorrendo no ambiente controlado que se deseja observar. Existem 3 situações diferentes nos processos de corrosão que são:

Liga passiva: a oxidação gera um filme uniforme na superfície, a taxa de corrosão é lenta.

Ligação pseudopassiva: um filme semi-aderente é gerado na superfície, o tempo de corrosão é intermediário.

Aglutinante não passivo: o material corroído começa a se dissolver na solução, a taxa de corrosão é rápida.

Outra forma de representar quantitativamente os valores de corrosão devido aos taxa de corrosão  $CR$  da substância é devido aos taxa de perda de massa do material corroído na solução, existe um método matemático adequado para determinar a dissolução do metal em

termos de penetração por ano em unidades de mm/ano. Observando a equação número (34)(Perez, 2004).

$$C_R = \frac{i_{corr} * A_w}{z * F * \rho} \quad (61)$$

onde  $i_{corr}$  é a densidade de corrente de corrosão em  $\text{A}/\text{cm}^2$ ,  $A_w$  é a massa molar em  $\text{g}/\text{mol}$ ,  $z$  é o número de elétrons na reação,  $F$  é a constante de Faraday ( $96485,34 \text{ C}/\text{mol}$ ) e  $\rho$  é a massa específica em  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

#### 3.2.4.6 *Análise do espectro sonoro*

Para realizar a análise do som, levaremos em conta dois dos parâmetros mencionados no item 1.5.5.1 Parâmetros do som. Os parâmetros a serem observados são: tonalidade e timbre, que podem ser facilmente obtidos por meio de gravações de áudio de cada uma das cordas no ar, tanto sem revestimento quanto com revestimento. Ao fazer isso, com os sinais de áudio em que temos o espectro de tempo vs. amplitude, por meio do Matlab e de um programa de transformada de Fourier, passaremos do espectro de tempo para o espectro de frequências, com isso obteremos os padrões tanto das frequências fundamentais de cada corda quanto de suas respectivas frequências secundárias, com isso poderemos observar se as cordas revestidas têm algum tipo de modificação em suas frequências. Poderemos observar os valores de timbre, este é apresentado de acordo com as amplitudes normalizadas, isso pode ser observado devido ao fato de que pela análise física das ondas estacionárias a frequência fundamental é a que tem um valor de timbre de maior amplitude, com isso poderemos observar se o timbre das cordas revestidas muda ou se é o mesmo.

### 3.2.5 **Deposição de DLC usando PECVD**

#### 3.2.5.1 *Preparação de amostra para deposição de DLC*

A preparação das cordas para realizar o revestimento pelo método Diamond-Like Carbon (DLC) foi realizada inicialmente por limpeza, iniciando com um banho de ultrassom em acetona a 99% de pureza por 15 minutos, depois outro banho de ultrassom de 99% álcool

isopropílico por 15 minutos, seguido de secagem em estufa a 100°C por um período de 5 minutos, isso a fim de remover todas as possíveis impurezas de gordura e demais contaminações associadas à fabricação industrial deles.

### 3.2.5.2 Deposição de DLC-H nas cordas da Violão

Os revestimentos de DLC foram depositados em cordas de Violão de níquel puro (Figura 20) usando deposição química na fase vapor assistida por plasma em uma atmosfera de Ar/C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>. As cordas foram colocadas no reator PECVD, as seguintes etapas descrevem como foi feita a deposição e seus parâmetros: Pressão da câmara com Ar é 2,8x10<sup>3</sup> torr, taxa fixa de vazão de entrada de Ar foi 10 sccm, tensão aplicada ao substrato a 620 V, corrente 0,1 Å, por 20 min, isso para limpar o ambiente da câmara de vácuo. Em seguida, uma camada intermediária de silano (SiH<sub>4</sub>) foi depositada para ajudar a melhorar a adesão, com pressão de 3,3x10<sup>2</sup> torr, vazão fixa de entrada de SiH<sub>4</sub> foi de 5 sccm, tensão de polarização aplicada ao substrato de 620 V, corrente de 0,05 Å, para 20 minutos. Finalmente, um depósito de acetileno (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) é feito com uma pressão de 3,8x10<sup>2</sup> torr, vazão de entrada fixa de C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> foi de 10 sccm, tensão de polarização aplicada ao substrato de 700 V, corrente de 0,1 Å, por 120 minutos (2 horas). Os parâmetros de deposição estão representados na Tabela 7. A Figura 25. contém uma fotografia o reator de deposição química na fase vapor assistida por plasma que foi usado para a deposição. A corda de Violão com e sem revestimento com DLC-H é mostrada na (a) e (b).

**Tabela 7.** Parâmetros de deposição

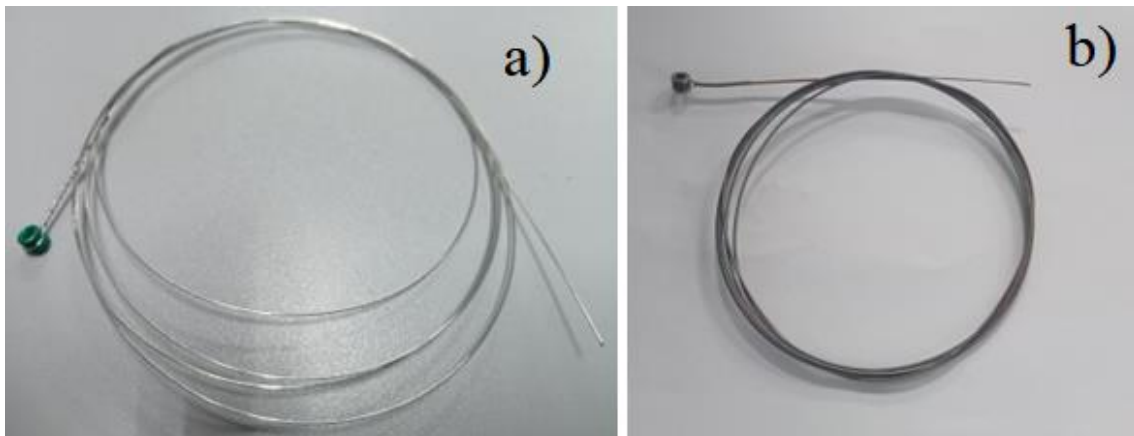
<b>Precursor</b>	<b>Pressão (Torr)</b>	<b>Tempo (min)</b>	<b>Taxas de fluxo (sccm)</b>	<b>Tensão (V)</b>	<b>Corrente (Å)</b>
Argônio (Ar)	2,8 x 10 <sup>3</sup>	20	10	600	0,1
Silano (SiH <sub>4</sub> )	3,3 x 10 <sup>2</sup>	20	5	600	0,05
Acetileno(C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	3,8 x 10 <sup>2</sup>	120	10	700	0,1

**Figura 25.** Reator PECVD para depósito de DLC



Fonte: Autor.

**Figura 26.** Inclui uma fotografia da corda sem (a) e com (b) revestimento de filme de DLC-H. Pode-se observar que a coloração do revestimento torna a corda mais escura.



Fonte: Autor.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 MORFOLOGIA E ESTEQUIOMETRIA

A composição química e morfologia das cordas foram estudadas via MEV e EDX respectivamente. As imagens (fotomicrografias) apresentadas têm uma ampliação entre 41 a 150 vezes, onde podem ser observadas algumas características topográficas específicas.

Foram realizadas análises de Energia dispersiva por Raios-X. (EDX) para avaliação da composição química das cordas. Nesta etapa, estes resultados, corroboraram com um melhor entendimento para melhoria da durabilidade e proteção contra a corrosão das cordas por revestimento DLC.

#### 4.1.1 Corda “e”

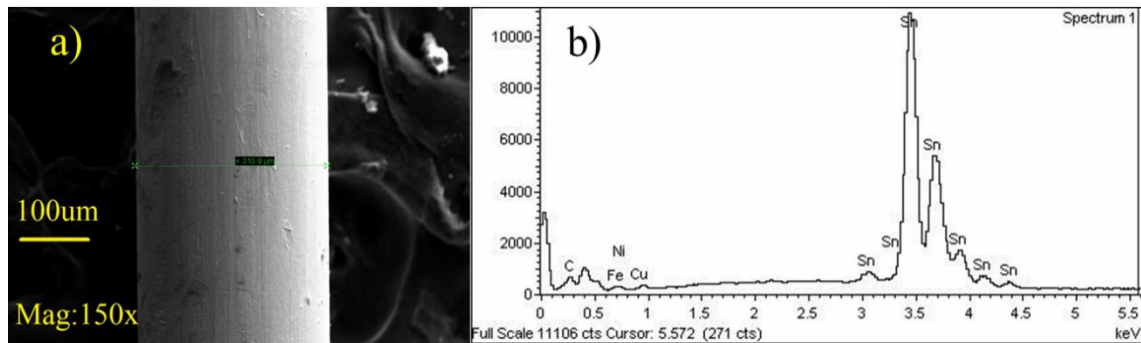
A Figura 27 mostra uma fotomicrografia da corda "e" (a) com uma ampliação de 150x, podem ser observadas imperfeições, que podem estar na fabricação industrial. Do ponto de vista morfológico, observa-se que a produção desse tipo de corda fabricada industrialmente apresenta um padrão cilíndrico com diâmetro aproximado de 310,9  $\mu\text{m}$ , pois podem ser vistos traços e formações lineares de diferentes cores, o que pode ser devido ao fato de que essas cordas podem ter camadas de revestimento. O espectro por análise EDX semiquantitativa (b) da corda "e". Pode-se observar nesse gráfico que a corda "e" tem uma química predominante de estanho, símbolo (Sn), na Tabela 8, onde tem um valor 39% em porcentagem atômico da superfície analisada, o segundo componente com a maior porcentagem foi o elemento químico Ferro, símbolo (Fe), o terceiro foi o Carbono (C) e o Cobre, símbolo (Cu) e o elemento Níquel, símbolo (Ni) aparecem como traços, com porcentagens de 2,4% e 0,27% respectivamente, como pode ser visto na Tabela 8.

**Tabela 8.** Resultados da composição química, peso e porcentagem atômica dos elementos presentes na corda “e” análise EDX.

Elementos	Peso %	Atômico %
C K	3.70	21.89
Fe K	28.38	36.14
Ni K	0.22	0.27
Cu K	2.19	2.45
Sn L	65.51	39.25
Total	100.00	

Fonte: O autor

**Figura 27.** Corda “e” sem revestimento contém fotomicrografia (a) e espectro por análise EDX (b).



Fonte: O autor

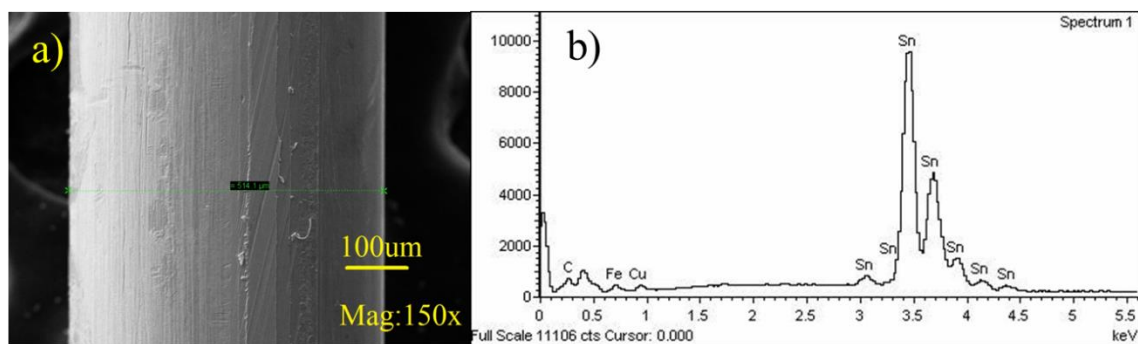
#### 4.1.2 Corda “B”

A Figura 28 mostra a fotomicrografia (a) da corda "B" com ampliação de 150x. Imperfeições também são observadas, do ponto de vista morfológico, um padrão cilíndrico com um diâmetro aproximado de 514,1 µm é observado. Espectro de análise EDX semiquantitativa da corda "B.". Nesse gráfico, pode-se observar que a corda "B" também tem uma composição semelhante à da corda "e", sendo que a corda "B" tem uma composição química predominante para o símbolo metálico estanho (Sn) com um total de 38% em porcentagem atômico da superfície analisada. O segundo componente com a maior porcentagem foi o elemento químico Ferro, símbolo (Fe), o terceiro foi o Carbono (C) e o Cobre, símbolo (Cu). O elemento químico Níquel não aparece na composição química, como pode ser visto na Tabela 9.

**Tabela 9.** Resultados da composição atômica da corda “B” em relação à análise EDX

Elementos	Peso %	Atômico %
C K	4.16	24.13
Fe K	28.17	35.16
Cu K	1.91	2.10
Sn L	65.77	38.62
Total	100.00	

Fonte: O autor

**Figura 28.** Corda “B” sem revestimento contém fotomicrografia (a) e espectro por análise EDX (b).

Fonte: O autor

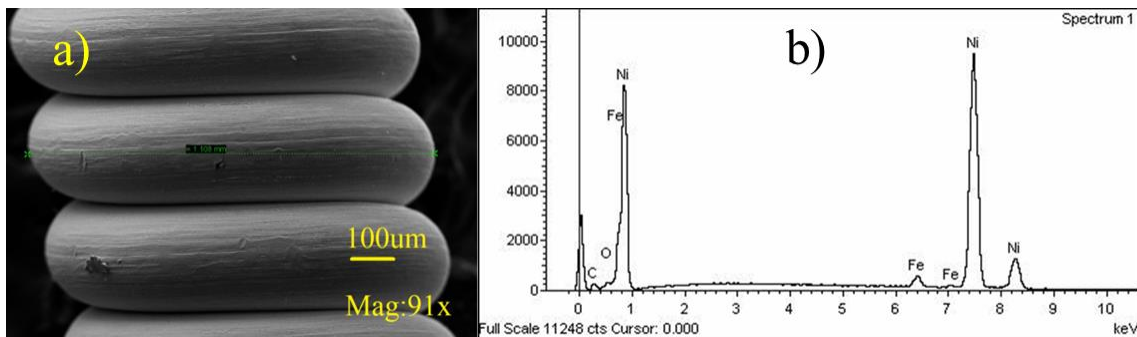
#### 4.1.3 Corda “D”

A Figura 29 contém uma fotomicrografia (a) da corda "D" com ampliação de 91x. É possível observar que essa corda não tem um padrão cilíndrico reto como as duas anteriores "E" e "B". O diâmetro aproximado do enrolamento da corda é de 1108 mm. O espectro da análise EDX (b) semiquantitativa do cabo "D". Pode-se observar nesse gráfico que o cabo "D" tem uma composição química predominante para o metal Níquel (Ni) com um total de 75% da superfície analisada. O segundo componente com a maior porcentagem foi o elemento químico Carbono, símbolo (C), o terceiro foi o Oxigênio e o Ferro com porcentagens de cerca de 2% e 1%, respectivamente, como pode ser visto na Tabela 10.

**Tabela 10.** Resultados da composição atômica da corda “D” em relação à análise EDX.

Elementos	Peso %	Atômica %
C K	5.01	20.12
O K	0.76	2.29
Fe K	2.15	1.86
Ni K	92.09	75.73
Total	100.00	

Fonte: O autor

**Figura 29.** Corda “D” sem revestimento contém fotomicrografia (a) e espectro por análise EDX (b).

Fonte: O autor

#### 4.1.4 Corda “D” Vista na frente

A Figura 30 contém uma micrografia (a) obtida por MEV da corda "D" vista de frente, com uma ampliação de 64x. A primeira observação relevante é que o núcleo dessa corda, conforme apresentado no numeral 1.5.4.3 núcleo das cordas é hexagonal, a presença desse núcleo nesse formato se deve ao fato de que as pontas quase afiadas têm melhor aderência no enrolamento. Nessa fotomicrografia, há duas caixas sombreadas em azul. A que está acima do núcleo (b) contém um gráfico do espectro por análise EDX semiquantitativa da corda "D" sobre o núcleo foi realizada para corroborar quais elementos químicos ele continha. Pode-se observar que o núcleo da corda "D" apresenta uma composição química predominantemente para o metal Ferro (Fe) sendo um total de 96% e Oxigênio (O<sub>2</sub>) e Cobalto em torno de 1% com o Alumínio aparecendo com um percentual de 0,75%, como pode ser visto na Tabela 11 (a). A caixa sombreada no enrolamento mostra um gráfico do espectro EDX semiquantitativo (c) da corda "D", a parte externa. Observa-se nesse gráfico que há uma composição química predominante

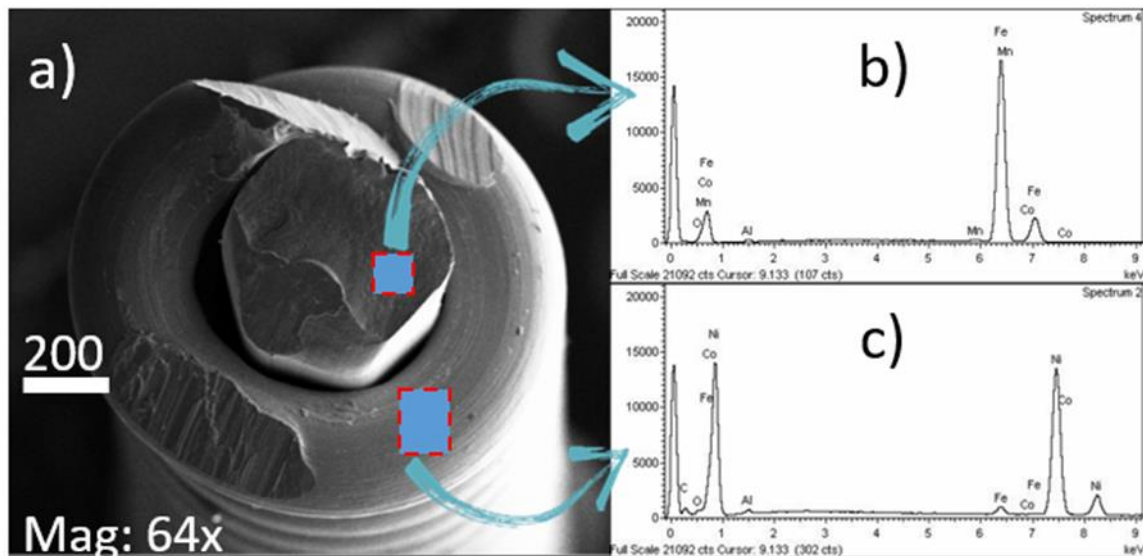
para o metal Níquel (Ni), com um total de 76% da superfície analisada, o segundo componente com maior porcentagem foi o elemento químico Carbono, símbolo (C), o terceiro foi o oxigênio, o elemento químico Ferro (Fe) com uma porcentagem próxima a 2%, Alumínio (Al) 1%, e o Cobalto aparece em traços com 0,27% respectivamente, como pode ser visto na Tabela 11 (b).

**Tabela 11.** Resultados de EDX da corda visto na frente, onde (a) são os valores respectivos do núcleo e (b) do enrolamento.

Elementos	Núcleo (a)		Enrolamento (b)		
	Peso %	Atômica %	Elementos	Peso %	Atômica %
O K	1.16	3.92	C K	3.27	13.45
Al K	0.75	1.49	O K	1.82	5.63
Mn K	0.65	0.63	Al K	0.97	1.78
Fe K	96.01	92.65	Fe K	2.48	2.2
Co K	1.43	1.31	Co K	0.33	0.27
Total	100		Ni K	91.12	76.66
			Total	100	

Fonte: O autor

**Figura 30.** Fotomicrográficas obtida via MEV da corda “D” vista na frente Fotomicrografia (a), análise de EDX do núcleo (b) e análise de EDX da bobina (c).



Fonte: Autor

#### 4.1.5 Corda “D” alongada

A

Figura 31 mostra uma fotomicrografia SEM (a) da corda "D", desenrolada para analisar sua respectiva morfologia com ampliação de 41x. Observa-se que o núcleo dessa corda possui faces e, conforme apresentado no item anterior, é hexagonal, podendo-se observar que o enrolamento é cilíndrico e está cobrindo o núcleo. Nessa fotomicrografia, há duas caixas sombreadas em azul. A que está acima do enrolamento (b) da corda "D" tem composição química predominante para o metal níquel (Ni) com um total de 91,37%,

Aqui podemos notar que o valor de níquel encontrado na corda se deve à liga mencionada acima, ou seja, é provável que no enrolamento das cordas nº 4, nº 5 e nº 6 tenha sido aplicado níquel para protegê-las, conforme apresentado acima (Soderman; Nylof, 2012).

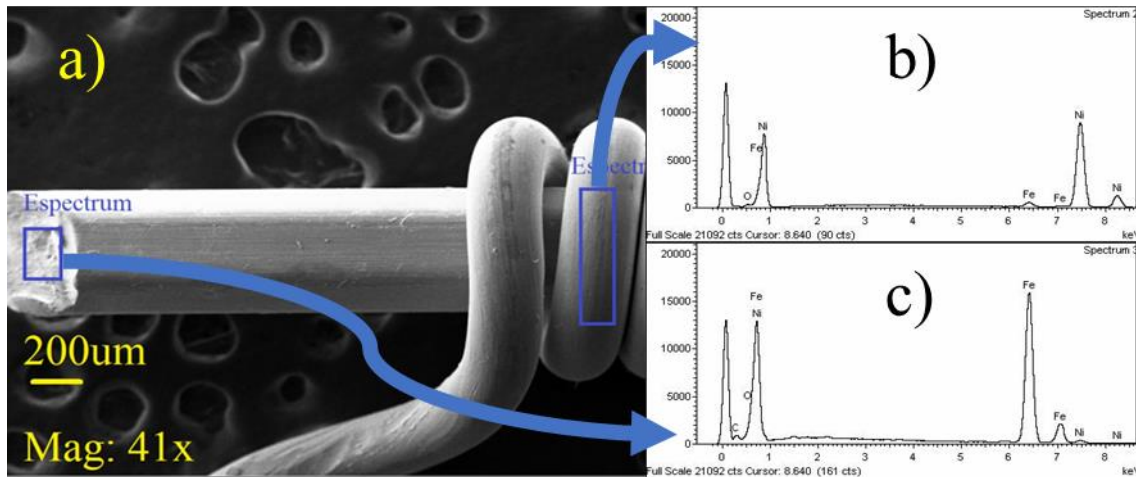
oxigênio (O2) com um total de 6,11% e ferro (Fe) com cerca de 2,53%, como pode ser visto na Tabela 12 (a). A que está acima do núcleo de corte (c) tem composição química predominante para o metal ferro (Fe) totalizando 80,97%, oxigênio (O2) totalizando 12,69%, carbono (C) totalizando 4,56% e níquel (Ni) totalizando cerca de 1,79%, como pode ser visto na Tabela 12 (b).

**Tabela 12.** Resultados de EDX da corda alongada, onde (a) são os valores respectivos do enrolamento e (b) os valores sobre o corte do núcleo.

Enrolamento (a)			Sobre o Corte (b)		
Elementos	Peso %	Atômica %	Elementos	Peso %	Atômica %
O K	1.74	6.11	C K	1.12	4.56
Fe K	2.52	2.53	O K	4.16	12.69
Ni K	95.74	91.37	Fe K	92.57	80.97
Total	100		Ni K	2.15	1.79
			Total	100	

Fonte: O autor

**Figura 31.** Corda 3 alongada



Fonte: Autor

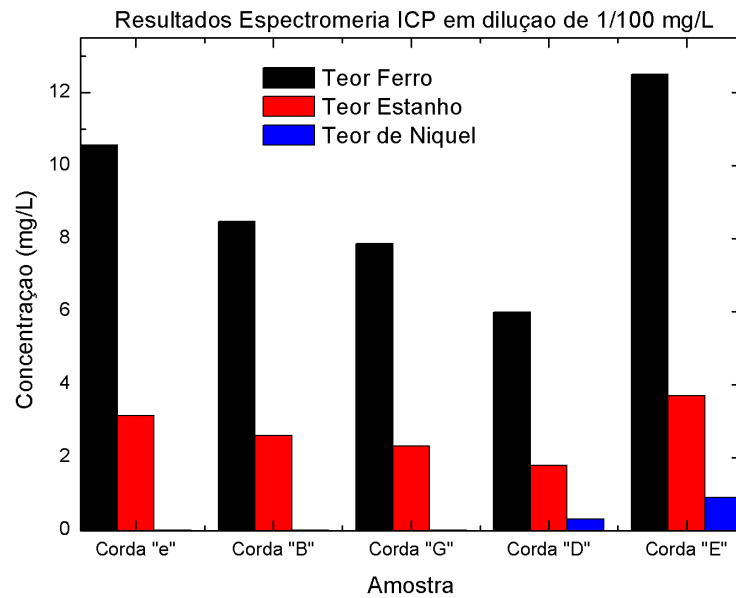
Ao revisar o plano geral das análises de EDX das cordas "e", "B" e "D", pode-se observar que alguns materiais que apresentam essas análises não são muito consistentes, em relação a isso foi determinado fazer testes com dois métodos diferentes de composição química para poder ter uma relação direta de quais eram os materiais que estavam nas cordas, Isso nos levou a realizar análises de Espectroscopia de Emissão Óptica de Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES) e fluorescência de raios X (XRF), que serão apresentadas nos parágrafos seguintes.

#### 4.2 ESPECTROSCOPIA DE EMISSÃO ÓPTICA COM PLASMA INDUTIVAMENTE ACOPLADO (ICP-OES)

A

Figura 32 mostra as quantidades de concentração de ferro, estanho e níquel de cada corda. Deve-se esclarecer que as concentrações desses materiais são um fator crítico que afeta diretamente as propriedades físicas e acústicas das cordas e, portanto, influencia o desempenho e a qualidade do som produzido pelo violão. No caso do ferro, que é comumente utilizado, a quantidade adequada de ferro na liga da corda é crucial, pois afeta a tensão e a resistência da corda. Uma concentração maior de ferro pode aumentar a durabilidade da corda e melhorar a estabilidade da afinação. No entanto, o excesso de ferro pode tornar as cordas mais pesadas e menos flexíveis, afetando negativamente a capacidade de produzir vibrações e alterando o timbre geral do violão; ele é frequentemente misturado a outros metais, como o estanho, para formar ligas mais resistentes à ferrugem e à corrosão causadas pelo suor e pela umidade. Entretanto, uma concentração excessiva de estanho pode tornar as cordas mais rígidas e afetar negativamente a sensação tátil e a ressonância. O níquel é amplamente utilizado em cordas de violão devido à sua resistência à corrosão e à capacidade de proporcionar um tom quente e equilibrado. As cordas de níquel são populares entre os violonistas devido à suavidade da tocabilidade e à capacidade de produzir um som suave e redondo. A concentração aprimorada de níquel afeta diretamente a capacidade das cordas de apresentar sobretons e sua sensibilidade à técnica de dedilhado e à força exercida sobre elas. O maior teor de níquel pode melhorar a qualidade tonal, mas também pode aumentar o custo das cordas. Na Figura 33, presumiu-se inicialmente que sua composição era predominantemente à base de níquel. Entretanto, a análise subsequente usando a técnica (ICP-OES) produziu revelações esclarecedoras. Em particular, a investigação revelou que as três primeiras cordas “e”, “B” e “G”, não tinham um componente significativo de níquel. Em vez disso, a presença predominante de ferro é evidente, com uma concentração de mais de 50% e um delicado esmalte de estanho. Esse intrincado arranjo composicional sugere uma constituição material marcadamente divergente da suposição inicial de predominância de níquel. Em contraste, uma tendência diferente é aparente nas cordas que vão da quarta à sexta posição “D”, “A”, “E”. Nesse subconjunto, a contribuição proporcional do níquel aumenta significativamente para menos de 20%; curiosamente, o estanho e o ferro aparecem como os componentes predominantes, com o ferro superando em muito os outros em concentração relativa. Esse gradiente na distribuição elementar ressalta a heterogeneidade matizada na composição das cordas, corroborando a intrincada interação de ferro, estanho e níquel no conjunto de cordas.

**Figura 32.** Componentes químicos de cordas analisados por espectroscopia de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) - Diluição 1/100 mg/L

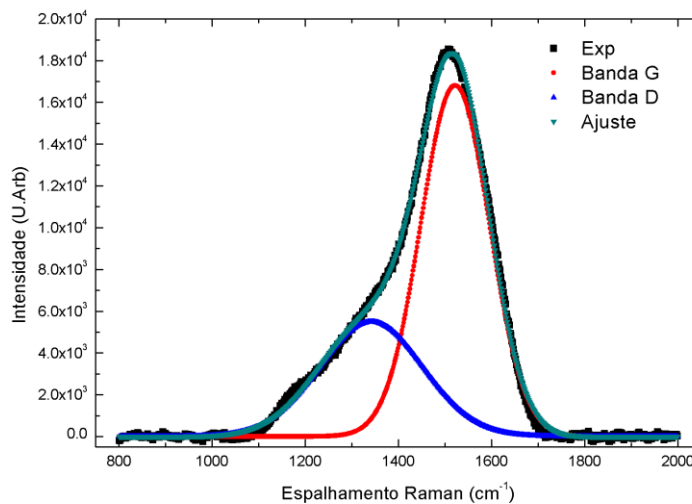


Fonte: Autor

### 4.3 ESPECTROSCOPIA RAMAN

No gráfico de espectroscopia Raman da Figura 33, podem ser observadas duas bandas de deconvolução. A banda D de hibridações desordenadas  $sp$ ,  $sp^2$  e  $sp^3$  está centrada em  $1341,10\text{ cm}^{-1}$ , a banda G da fase  $sp^2$  pura, referente aos anéis de grafite, está centrada em  $1521,78\text{ cm}^{-1}$  que, no nosso caso, refere-se à cadeia com o menor valor de ID/IG de 0,33.

**Figura 33.** Espectro Raman do revestimento de DLC com menor valor de ID/IG



Fonte: Autor

Em na Tabela 13 vamos apresentar os valores que obtivemos com seus respectivos valores de FWHM, picos e intensidades da cadeia com o menor valor de ID/IG.

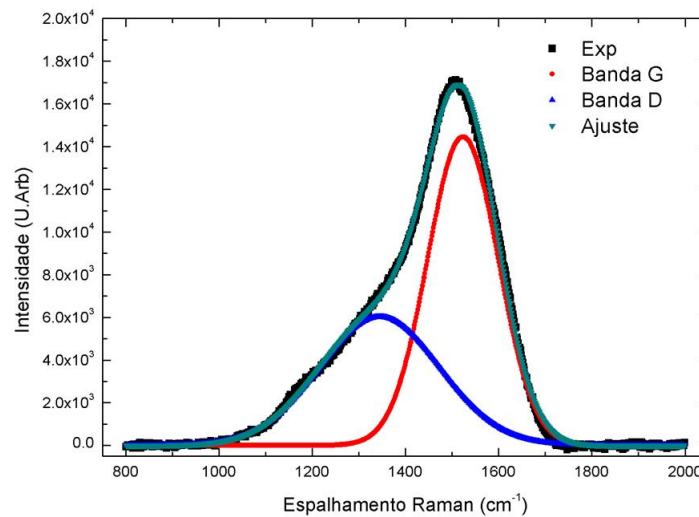
**Tabela 13.** Relação do espectro Raman com os respectivos valores de intensidade, valor de pico, FWHM e ID/IG da Figura 33

1	Posição	Intensidade	FWHM	ID/IG
Banda D	1341,10	5502,81	266,44	0,33
Banda G	1521,78	16775,41	175,08	

Fonte: O autor

Na Figura 34, a banda D das hibridizações está centrada em  $1344,58 \text{ cm}^{-1}$  e a banda G da fase  $\text{sp}^2$  pura dos anéis de grafite está centrada em  $1523,37 \text{ cm}^{-1}$  que, em nosso caso, refere-se à corda com o menor valor de ID/IG de 0,42. A diferença entre as intensidades de ID/IG apresenta um valor de 0,33 a 0,42. A posição da banda G e a relação ID/IG indicam que o DLC produzido tem características de carbono amorfo hidrogenado (FERRARI; ROBERTSON, 2000).

**Figura 34.** Espectro Raman do revestimento de DLC com maior valor de ID/IG



Fonte: Autor

Em na Tabela 14 vamos apresentar os valores que obtivemos com seus respectivos valores de FWHM, picos e intensidades da cadeia com o maior valor de ID/IG.

**Tabela 14.** Relação do espectro Raman com os respectivos valores de intensidade, valor de pico, FWHM e ID/IG da Figura 34

2	Posição	Intensidade	FWHM	ID/IG
Banda D	1344,58	6050,43	309,45	0,42
Banda G	1523,37	14400,28	179,29	

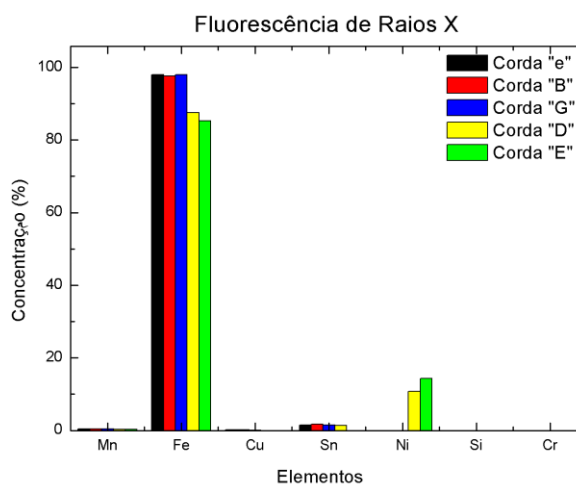
Fonte: O autor

#### 4.4 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (XRF)

Aproximadamente 0,1 g de amostras foram dissolvidas em 10 mL de ácido clorídrico em um banho de água a 100 °C. Em seguida, uma solução de carbonato de sódio a 20% foi adicionada ao pH alcalino para precipitar os metais da amostra em carbonatos. A amostra foi centrifugada a 1500 rpm, e o precipitado de carbonatos metálicos foi analisado em XRF-EDX.

Levando em conta que várias análises foram realizadas para determinar e verificar quais materiais as cordas do violão possuíam. A Figura 35 mostra os resultados obtidos pelo método de espectrofotometria de fluorescência de raios X (XRF), em que as porcentagens de ferro nas três primeiras cordas estão acima de 98%, e o restante é estanho, sem níquel. Por outro lado, as cordas que possuem enrolamentos têm porcentagens de ferro próximas a 90%, concentração de níquel entre 10% e 20% e uma concentração de estanho inferior a 5%.

**Figura 35.** Componentes químicos de cordas analisados por espectroscopia de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) - Diluição 1/100 mg/L. Valores em porcentagem dos elementos.



Fonte: Autor

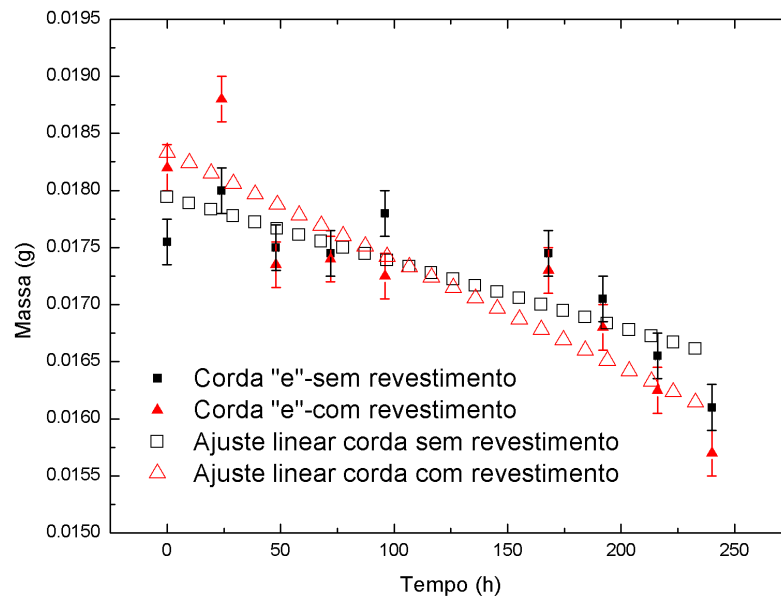
#### 4.5 VARIACÃO DA MASSA DE CORDAS REVESTIDAS E NÃO REVESTIDAS COM RELAÇÃO AO TEMPO PELA IMERSÃO DAS CORDAS EM SUOR SINTÉTICO

O experimento de imersão das cordas revestidas e não revestidas foi realizado com duas amostras não revestidas e duas revestidas, para obter mais dados e, em seguida, fazer uma média entre as cordas não revestidas e uma média das cordas revestidas, o que foi feito para cada tipo de corda separadamente, para ver como o suor sintético ataca cada uma das cordas. As medições foram feitas a cada 24 horas nos primeiros 5 dias (96 horas), depois o sábado e o domingo foram pulados e as medições foram feitas novamente na segunda-feira seguinte, 168 horas, para completar as 240 horas, ou seja, nos três dias seguintes.

##### 4.5.6 Corda “e”

A Figura 36 mostra os dados da corda "e" sem revestimento com pontos quadrados pretos e os dados da corda "e" com revestimento com pontos circulares vermelhos; foi feito um ajuste linear em cada um dos dados separadamente para observar os valores de perda de massa para cada um deles. O ajuste da corda "e" sem revestimento tem um valor de perda de massa de  $5,71E-06 \pm 1,43E-06$  g/h, o ajuste da corda "e" com revestimento tem um valor de  $9,40E-06 \pm 1,78E-06$  g/h. Ao realizar essas análises lineares, pode-se observar que a perda de massa das cordas com revestimento é maior, o que pode ser devido a dois fatores: ou essa corda revestida está sendo mais atacada pela corrosão ou pela perda devido à delaminação do revestimento DLC. Por outro lado, a diferença entre a perda da corda revestido e da corda sem revestimento é de  $3,69E-06$  g/h, que a diferença nessa ordem é significativa entre esses valores, mas não é significativa em termos gerais para a durabilidade da corda.

**Figura 36.** Variação das massas das amostras das cordas “e” sem e com revestimento.

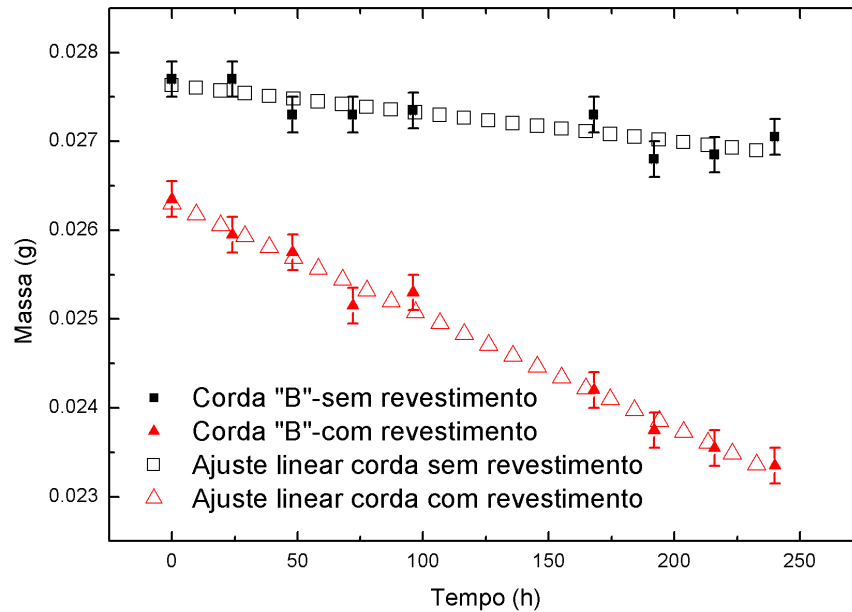


Fonte: Autor

#### 4.5.7 Corda “B”

A Figura 37 mostra os dados da corda "B" sem revestimento, pontos quadrados pretos, e os dados da corda "B" com revestimento, pontos circulares vermelhos; para cada um dos dados separadamente, foi feito um ajuste linear para observar os valores da perda de massa de cada um deles. O ajuste da corda "B" sem revestimento tem um valor de perda de massa de  $3.15\text{E-}06 \pm 6.76\text{E-}07$  g/h, enquanto o ajuste da corda "B" com revestimento tem um valor de  $1.26\text{E-}05 \pm 5.53\text{E-}07$  g/h. Ao realizar essas análises lineares, pode-se observar que a perda de massa das cordas revestidos é maior, nesse caso, os fatores podem ser os mesmos que no caso do corda "e", mas, ainda assim, a diferença na perda de massa desse corda sem revestimento em relação ao corda revestido é de  $9.47\text{E-}06$  g/h, onde esse valor é de maior significância, deve-se observar e lembrar que esse corda é mais grosso, ou seja, tem mais material e isso também pode ser um fator na obtenção desse tipo de resultado.

**Figura 37.** Variação das massas das amostras das cordas “B” sem e com revestimento.

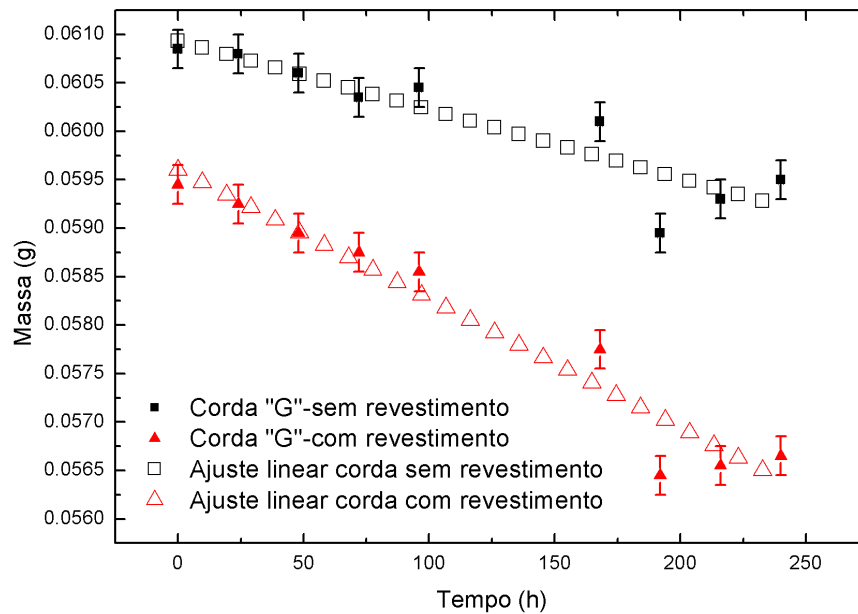


Fonte: Autor

#### 4.5.8 Corda “G”

A Figura 38 mostra os dados da corda "G" não revestida com pontos quadrados pretos e os dados da corda "G" revestida com pontos circulares vermelhos; foi feito um ajuste linear em cada um dos dados separadamente para observar os valores da perda de massa de cada um deles. O ajuste da corda "G" não revestido tem um valor de perda de massa de  $7.10\text{E-}06 \pm 1.22\text{E-}06$  g/h, enquanto o ajuste da corda "G" revestido tem um valor de  $1.33\text{E-}05 \pm 1.24\text{E-}06$  g/h. Ao realizar essas análises lineares, pode-se ver que a perda de massa do corda revestido é maior, ao observar esses resultados e lembrar o que foi dito anteriormente, onde sabemos que esse corda é mais grosso e, portanto, tem uma quantidade maior de material, aqui, ao contrário do que acontece com o corda "B", as medições de perda de massa das duas amostras são quase o mesmo valor da corda "B" e a diferença entre elas é de apenas  $6.22\text{E-}06$  g/h, onde claramente há uma diminuição em relação ao corda "B".

**Figura 38.** Variação das massas das amostras das cordas “G” sem e com revestimento.

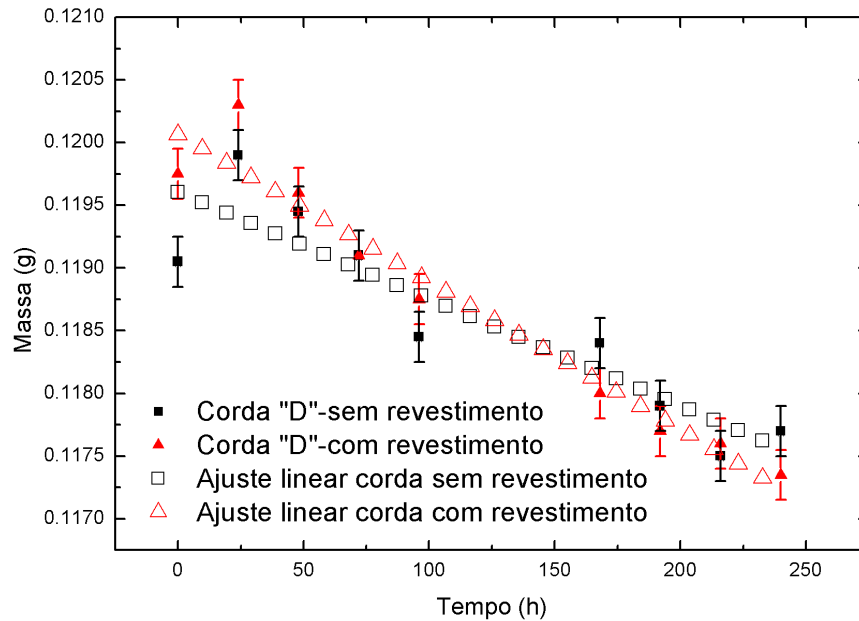


Fonte: Autor

#### 4.5.9 Corda “D”

A Figura 39 mostra os dados da corda "D" sem revestimento com pontos quadrados pretos e os dados da corda "D" revestida com pontos circulares vermelhos; foi feito um ajuste linear em cada um dos dados separadamente para observar os valores de perda de massa para cada um deles. O ajuste da corda "D" não revestido tem um valor de perda de massa de  $8.51\text{E-}06 \pm 1.43\text{E-}06$  g/h, enquanto o ajuste da corda "D" revestido tem um valor de  $1.18\text{E-}05 \pm 1.03\text{E-}06$  g/h. Ao realizar essas análises lineares, pode-se observar que a perda de massa das cordas revestidos é maior. Aqui temos em mente que essa corda é composta de um núcleo e um enrolamento, que por sua vez tem uma quantidade maior de matéria, e pelos resultados estequiométricos de EDX, XRF e ICP-OES temos que eles têm uma porcentagem de níquel que, mesmo sendo de baixo nível, faz com que as condições de ataque do suor mudem. A diferença entre a corda sem revestimento e a corda revestida é de  $3.26\text{E-}06$  g/h, que esse valor de perda de massa é menor em comparação com a corda "G".

**Figura 39.** Variação das massas das amostras das cordas “D” sem e com revestimento.

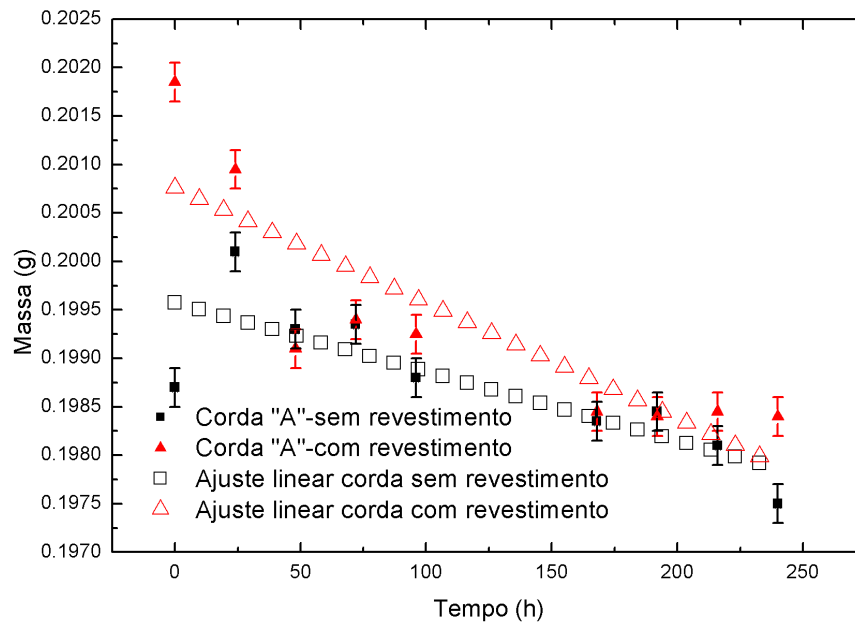


Fonte: Autor

#### 4.5.10 Corda “A”

A Figura 40 mostra os dados da corda "A" sem revestimento, pontos quadrados pretos, e os dados da corda "A" com revestimento, pontos circulares vermelhos; para cada um dos dados separadamente, foi feito um ajuste linear para observar os valores da perda de massa de cada um deles. O ajuste da corda "A" sem revestimento tem um valor de perda de massa de  $7.12\text{E-}06 \pm 1.87\text{E-}06$  g/h, enquanto o ajuste da corda "A" com revestimento tem um valor de  $1.19\text{E-}05 \pm 2.78\text{E-}06$  g/h. Ao realizar essas análises lineares, observa-se que a perda de massa do cabo revestido também é maior, porém esse cabo tem os mesmos materiais que o cabo "D". A perda de massa do cabo revestido é próxima ao valor de perda de massa do cabo "D" revestido, o que pode ser devido à maior quantidade de níquel que protege o cabo. O valor de perda de massa da corda sem revestimento se aproxima do valor de perda de massa da corda "G" sem revestimento; devemos lembrar que a corda "A" tem o dobro da espessura da corda "G". A diferença entre a corda sem revestimento e a corda com revestimento é de  $4,79\text{E-}06$  g/h, que é menor em comparação com a corda "D".

**Figura 40.** Variação das massas das amostras das cordas “A” sem e com revestimento.

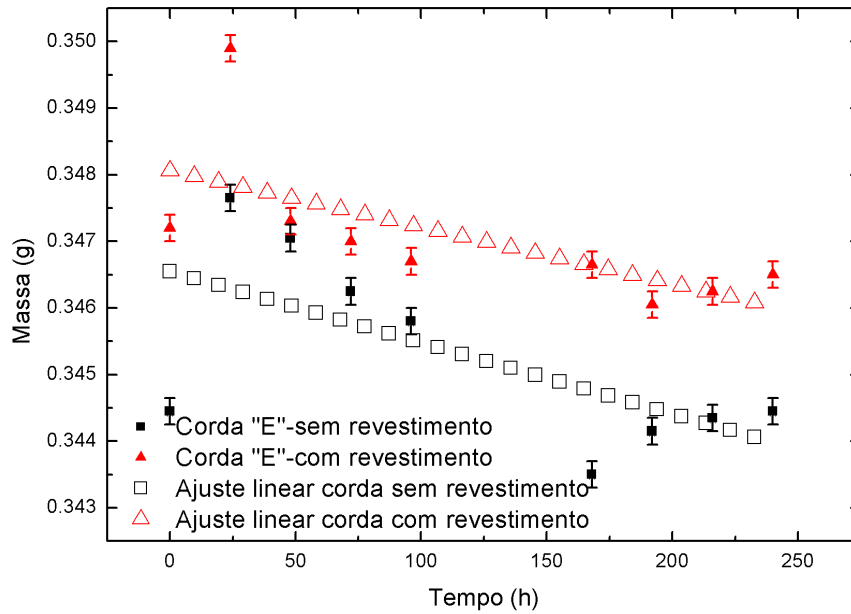


Fonte: Autor

#### 4.5.11 Corda “E”

A Figura 41 mostra os dados da corda "E" sem revestimento, pontos quadrados pretos, e os dados da corda "E" com revestimento, pontos circulares vermelhos; para cada um dos dados separadamente, foi feito um ajuste linear para observar os valores da perda de massa de cada um deles. O ajuste da corda "E" sem revestimento tem um valor de perda de massa de  $1.07\text{E}-05 \pm 4.65\text{E}-06$  g/h, enquanto o ajuste da corda "E" com revestimento tem um valor de  $8.49\text{E}-06 \pm 3.67\text{E}-06$  g/h. Ao realizar essas análises lineares, observa-se que a perda de massa da corda sem revestimento é maior do que a perda de massa da corda com revestimento. Deve-se observar que essa corda tem a mesma composição química que as cordas "D" e "A". A perda de massa da corda "E" não revestida é a maior perda de massa das cordas não revestidas, sendo uma ordem de grandeza maior do que as outras; por outro lado, a perda de massa da corda "E" revestida está próxima do valor da perda de massa da corda "e" revestida e do valor da perda de massa da corda "D" não revestida. A diferença na perda de massa em favor da corda revestida é de  $2,19\text{E}-06$  g/h, que é a menor diferença entre cordas revestidas e não revestidas.

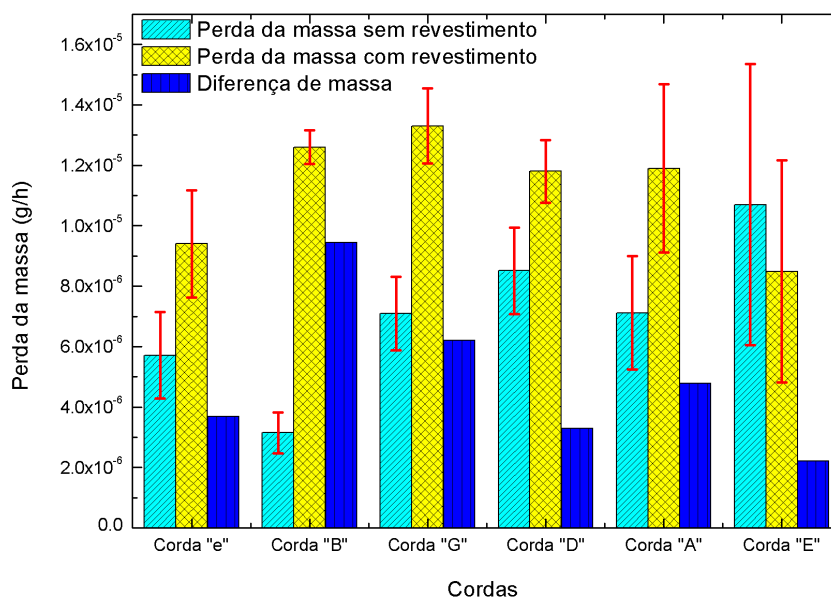
**Figura 41.** Variação das massas das amostras das cordas “E” sem e com revestimento.



Fonte: Autor

Para corroborar o que foi dito nesta seção, serão apresentados um gráfico e uma tabela com os valores de perda de massa de cada corda e sua margem de erro, a fim de entender melhor o que aconteceu.

**Figura 42.** Variação das massas das amostras das cordas com e sem revestimento.



Fonte: Autor

**Tabela 15.** Dados de perda de massa para cada corda com e sem revestimento.

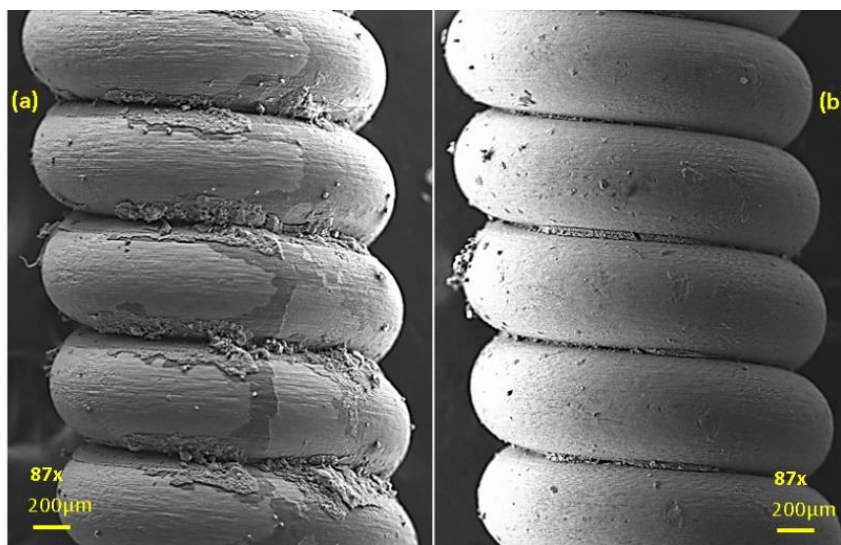
	<b>Perda da massa sem Revestimento</b>	<b>Erro sem Revestimento</b>	<b>Perda da massa com Revestimento</b>	<b>Erro com Revestimento</b>	<b>Diferença</b>
<b>Corda "e"</b>	5.71E-06	1.43E-06	9.40E-06	1.78E-06	3.69E-06
<b>Corda "B"</b>	3.15E-06	6.76E-07	1.26E-05	5.53E-07	9.47E-06
<b>Corda "G"</b>	7.10E-06	1.22E-06	1.33E-05	1.24E-06	6.22E-06
<b>Corda "D"</b>	8.51E-06	1.43E-06	1.18E-05	1.03E-06	3.26E-06
<b>Corda "A"</b>	7.12E-06	1.87E-06	1.19E-05	2.78E-06	4.79E-06
<b>Corda "E"</b>	1.07E-05	4.65E-06	8.49E-06	3.67E-06	2.19E-06

Fonte: Autor

#### **4.5.12 Comparação da corrosão da corda "E" com revestimento e sem Revestimento a partir da MEV**

Ao observar os dados obtidos pela perda de massa das cordas em imersão do suor sintético, queríamos observar o que poderia estar acontecendo com as cordas sem e com revestimentos, amostras da corda "E" foram levadas para o MEV para observar as diferenças que elas poderiam ter. Na Figura 43, temos duas fotomicrografias com uma ampliação de 87x da corda "E" com revestimento (a) e sem revestimento (b). Na fotomicrografia (a), podemos observar a corda "E" com revestimento, onde podemos ver como o suor sintético atacou o DLC de laminado a corda e tendo acúmulo de corrosão entre as bobinas, ou seja, o suor atacou diretamente o revestimento DLC, desprendendo-o e acumulando fortes grumos entre a separação do enrolamento. Na fotomicrografia (b) temos a corda sem revestimento onde a corrosão também atacou principalmente na junção das bobinas, mas de forma mais uniforme, não com tantos grumos e em algumas partes das bobinas alguns pequenos grumos que não são comparáveis aos que podem ser observados na fotomicrografia (a).

**Figura 43.** A figura apresenta duas fotomicrografias de SEM com ampliação de 87x, onde temos (a) corda "E" revestida e (b) corda "E" não revestida.



Fonte: Autor

#### 4.6 VARIAÇÃO DA TONALIDADE E DO TIMBRE DAS CORDAS COM E SEM REVESTIMENTO

Aqui nesta seção, conforme explicado no item 1.5.5.1 parâmetros sonoros, será feita uma análise da tonalidade (frequência) e do timbre (para diferenciar as fontes), para observar as diferenças que têm as cordas sem revestimento vs. as cordas com revestimento, pois com essa análise podemos ter algumas diferenças que podem fazer com que o revestimento DLC possa ou não ser viável para músicos que tenham um bom ouvido e não queiram variar esse tipo de qualidades em termos de sonoridade.

##### 4.6.1 Variação do timbre e tonalidade do acorde "G" em cordas com e sem revestimento

Na Figura 44, temos os espectros sonoros do acorde "G" das cordas sem revestimento (a) e das cordas com revestimento (b), onde podemos diferenciar as frequências. Na seção 1.4.4, falamos sobre a sobreposição de ondas; nessa figura, observamos esse fenômeno em que temos várias frequências juntas para o caso do acorde de "G"; temos "G" na segunda oitava (97,99 Hz), "B" na segunda oitava (123,47 Hz) e "D" na terceira oitava (146,83), embora seja

definido como uma única tonalidade geral do acorde de "G", essas frequências são mostradas na tabela 6, essas notas continuarão se repetindo no dobro de sua frequência, conforme explicado acima. Na seção 1.5.5.3 Espectro audível, foram apresentadas as diferentes frequências com suas respectivas notas. De acordo com o que é apresentado na tabela 6 e comparando com as frequências obtidas das cordas sem revestimento e com revestimento, temos na Tabela 16:

**Tabela 16.** Variação das notas individuais do acorde "G" de acordo com a tabela 6 em comparação com as notas individuais do acorde sem revestimento e com revestimento DLC.

Acorde "G"						
	Nota "G"	Diferença "G" vs. Fn tabela 6	Nota "B"	Diferença "B" vs. Fn tabela 6	Nota "D"	Diferença "D" vs. Fn tabela 6
Hz						
frequência do acorde "G" segue tabla. 6	97.99		123.47		146.83	
frequência natural acorde "G" sem Revestimento	98.15	0.16	123.53	0.06	146.71	0.12
frequência natural acorde "G" com Revestimento	97.47	0.52	123.81	0.34	146.38	0.45

Fonte: O autor

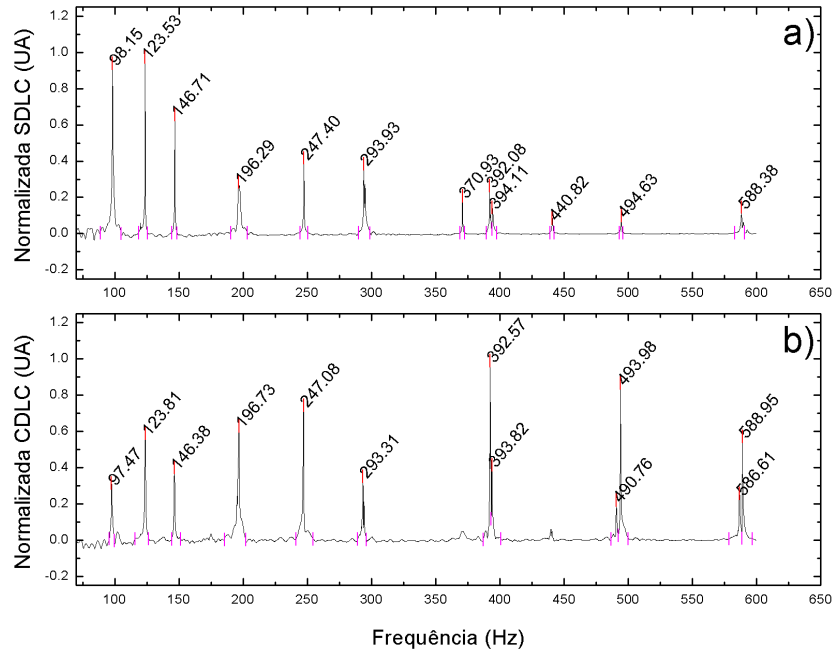
As frequências seguintes não serão verificadas, tendo em vista que são o dobro da primeira, então de acordo com isso não será necessário realizar, mas já com isso podemos notar que além de ter variação significativa com as apresentadas na Tabela 6, tanto as cordas sem revestimento quanto as cordas com revestimento mudam de frequência, e se compararmos diretamente as observadas no experimento podemos notar isso:

- O acorde na nota "G" da corda com revestimento versus a corda sem revestimento tem uma diferença de 0,68 Hz com as cordas sem revestimento tendo um valor maior.
- O acorde na nota "B" da corda revestida em comparação com a corda não revestida tem uma diferença de 0,28 Hz, com o valor mais alto para as cordas revestidas.
- O acorde na nota "D" da corda revestida em relação à corda não revestida tem uma diferença de 0,33 Hz, com a corda não revestida apresentando o valor mais alto.

Por outro lado, pode-se observar que o timbre do acorde "G" mudou de posição, nas cordas sem revestimento os valores do timbre mais alto estão na frequência fundamental da nota "G" oitava

2 e na frequência da oitava 2 da nota "B", enquanto o timbre das cordas revestidas do acorde "G" está próximo da nota "G" oitava 4 e da nota "B" oitava 4, ou seja, nesse caso, duas oitavas acima das cordas sem revestimento.

**Figura 44.** Na figura, temos dados de frequência para o acorde "G" nas cordas sem revestimento (a) e com revestimento (b).



Fonte: Autor

#### 4.6.2 Corda "e"

Na Figura 45, temos os dados de frequência da corda "e" sem revestimento (a) e com revestimento (b). Tomando como base a frequência fundamental da corda "e" expressa na Tabela 6, temos que a frequência natural dessa corda no ar tem um valor de 329,63 Hz, enquanto a corda "e" sem revestimento (a) tem um valor de frequência natural de 330,75 Hz e a corda revestida (b) tem um valor de 330,34 Hz, onde se nota uma clara diferença em relação à mostrada na Tabela 6 com relação ao nosso experimento. As diferenças nas frequências fundamental e secundária das cordas sem revestimento e com revestimento tocadas no ar são mostradas na Tabela 17.

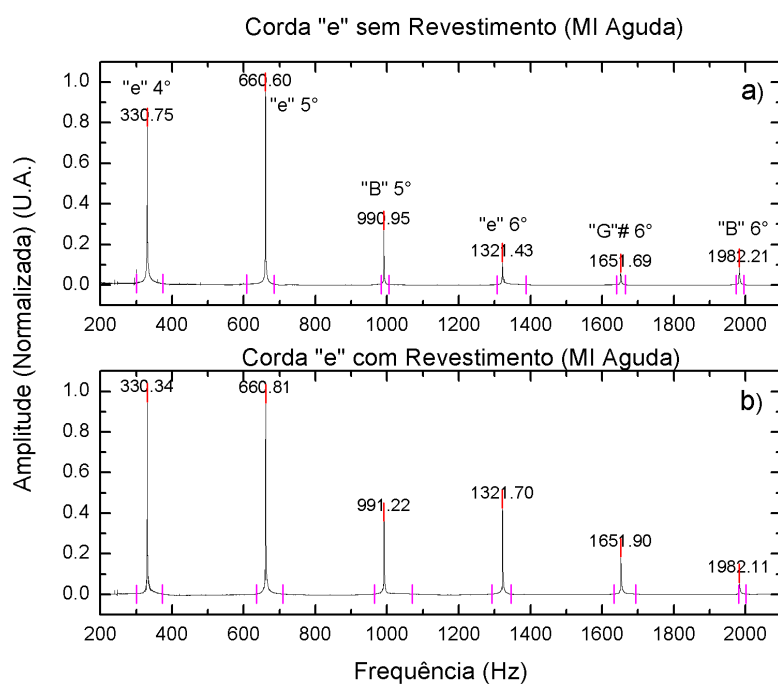
**Tabela 17.** Variação da tonalidade (frequências, fundamental e secundária) da corda "e" em relação à apresentada na tabela 6.

	"e" 4°	Diferença a "e" 4° vs. Fn tabela 6	"e" 5°	Diferença a "e" 5° vs. Fn tabela 6	"B" 5°	Diferença a "B" 5° vs. Fn tabela 6	"e" 6°	Diferença a "e" 6° vs. Fn tabela 6	"G" # 6°	Diferença a "G" # 6° vs. Fn tabela 6	"B" 6°	Diferença a "B" 6° vs. Fn tabela 6
	Hz											
Frequência natural segue tabela. 6	329.6		659.2		987.7		1318.5		1661.2		1975.5	
Frequência natural Corda "e" sem Revestimento	330.7	1.12	660.6	1.35	990.9	3.18	1321.4	2.92	1651.6	9.53	1982.2	6.68
Frequência natural Corda "e" com Revestimento	330.3	0.71	660.8	1.56	991.2	3.45	1321.7	3.19	1651.9	9.32	1982.1	6.58

Fonte: O autor

Além dessas diferenças de frequência, há também uma alteração no timbre entre a corda "e" sem revestimento e a corda com revestimento DLC. Se observarmos atentamente os valores normalizados das diferentes notas da corda "e", poderemos ver que pelo menos o valor da amplitude normalizada na frequência fundamental da corda revestida tem um valor mais alto do que na corda não revestida. Na nota "B" 5° também há uma pequena diferença, não muito significativa, mas na oitava "e" 6° ela é muito perceptível, o que significa que o som final que chega ao músico varia, o que significa que o timbre da corda "e" no ar realmente muda.

**Figura 45.** Na figura, temos dados de frequência para a corda "e" nas cordas sem revestimento (a) e com revestimento (b).



Fonte: Autor

### 4.6.3 Corda "B"

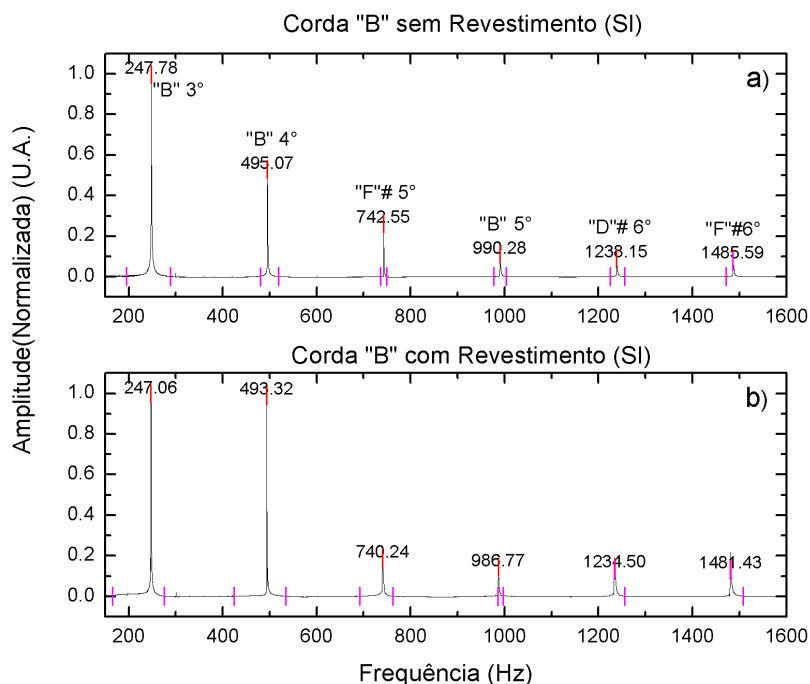
Na Figura 46 temos os dados de frequência da corda "B" sem revestimento (a) e com revestimento DLC (b), onde se pode observar que as frequências entre essas cordas variam em cada frequência, pode-se observar que nos casos em que a frequência tem um valor mais alto a variação das cordas revestidas tende a ser menor do que as cordas não revestidas, para mostrar melhor a variação apresentamos a Tabela 18 onde é feita uma comparação com relação aos dados da Tabela 6 com relação às cordas revestidas e não revestidas.

**Tabela 18.** Variação da tonalidade (frequências, fundamental e secundária) da corda "B" em relação à apresentada na Tabela 6.

	"B" 3°	Diferença "B" 3° vs. Fn tabela 6	"B" 4°	Diferença "B" 4° vs. Fn tabela 6	"F"# 5°	Diferença "F"# 5° vs. Fn tabela 6	"B" 5°	Diferença "B" 5° vs. Fn tabela 6	"D"# 6°	Diferença "D"# 6° vs. Fn tabela 6	"F"# 6°	Diferença "F"# 6° vs. Fn tabela 6
<b>Hz</b>												
<b>frequência natural segue tabla. 6</b>	246.94		493.88		739.99		987.77		1244.51		1479.98	
<b>frequência natural Corda "B" sem Revestimento</b>	247.78	0.84	495.07	1.19	742.55	2.56	990.28	2.51	1238.15	6.36	1485.59	5.61
<b>frequência natural Corda "B" com Revestimento</b>	247.06	0.12	493.32	0.56	740.24	0.25	986.77	1.00	1234.50	10.01	1481.43	1.45

Por outro lado, também fica claro que o timbre da corda revestida muda em comparação com a corda não revestida, pois o valor da frequência "B" 4° (493,88 Hz de acordo com a Tabela 6), no caso da corda não revestida, tem metade do valor da amplitude normalizada para a corda revestida, ou seja, o timbre da corda revestida tem um timbre mais alto do que o da corda não revestida, ou seja, o valor da amplitude normalizada para a corda revestida tem metade do valor da amplitude normalizada para a corda revestida, No caso da corda com revestimento, para ouvidos bem desenvolvidos, você perceberá que essas duas oitavas, tanto a 3ª quanto a 4ª da corda "B" com revestimento DLC, apresentarão um timbre mais alto, ou seja, a nota ouvida varia de acordo com o timbre de cada escala e, como se trata de uma superposição de ondas, o timbre será diferente. As outras frequências em termos de timbre (amplitude normalizada) não mudam significativamente.

**Figura 46.** Na figura, temos dados de frequência para a corda "B" nas cordas sem revestimento (a) e com revestimento (b).



Fonte: Autor

#### 4.6.4 Corda "G"

Na Figura 47, temos os dados de frequência da corda "G" das cordas sem revestimento (a) e com revestimento DLC (b), onde podemos ver, nesse caso, que todas as frequências da corda com revestimento DLC têm valores mais baixos do que a corda sem revestimento. Da mesma forma que nos casos anteriores, tomaremos como referência a Tabela 6, na qual comparamos as frequências das cordas sem revestimento e com revestimento em relação aos valores da Tabela 6 para ver a diferença das respectivas frequências, como podemos ver na Tabela 19.

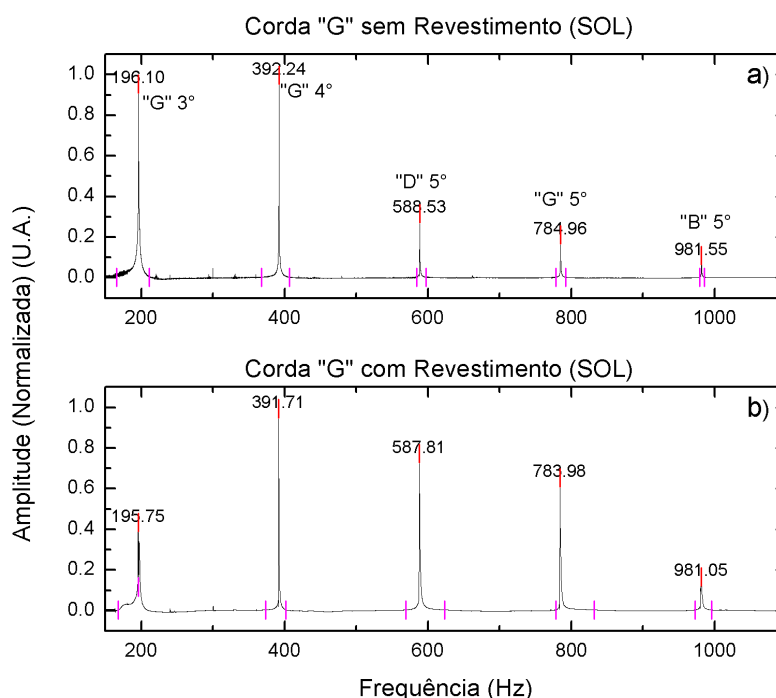
**Tabela 19.** Variação da tonalidade (frequências, fundamental e secundária) da corda "G" em relação à apresentada na tabela 6.

	"G" 3°	Diferença "G" 3° vs. Fn tabela 6	"G" 4°	Diferença "G" 4° vs. Fn tabela 6	"D" 5°	Diferença "D" 5° vs. Fn tabela 6	"G" 5°	Diferença "G" 5° vs. Fn tabela 6	"B" 5°	Diferença "B" 5° vs. Fn tabela 6
	Hz									
frequência natural segun tabla. 6	196.00		392.00		587.33		783.99		987.77	
frequência natural Corda "G" sem Revestimento	196.10	0.10	392.24	0.24	588.53	1.20	784.96	0.97	981.55	6.22
frequência natural Corda "G" com Revestimento	195.75	0.25	391.71	0.29	587.81	0.48	783.98	0.01	981.05	6.72

Fonte: O autor

Agora, nesse caso, é muito perceptível como o timbre da corda revestida de DLC muda em comparação com a corda não revestida. A primeira coisa a se notar é que a frequência fundamental da corda "G" (196,00 Hz, de acordo com a tabela 6) da corda revestida tem metade do valor da amplitude normalizada em comparação com a corda não revestida, Isso significa que, ao ouvir o som da corda revestida, ela tem uma forte influência na 4a oitava, da mesma forma que as frequências seguintes, "D" 5° e "G" 5°, também têm o dobro dos valores de amplitude, fazendo com que essa corda com DLC soe um pouco mais aguda do que deveria.

**Figura 47.** Na figura, temos dados de frequência para a corda "G" nas cordas sem revestimento (a) e com revestimento (b).



Fonte: Autor

#### 4.6.5 Corda "D"

Na Figura 48, temos os dados de frequência da corda "D" das cordas sem revestimento (a) e com revestimento DLC (b). Vale lembrar que essa é a primeira corda do conjunto que possui o enrolamento em um núcleo, da mesma forma que na corda anterior "G" os valores de frequência da corda revestida possuem valores menores que a corda sem revestimento, porém, da mesma forma será comparado com o padrão da Tabela 6 que é o estabelecido, na Tabela 20 temos os dados.

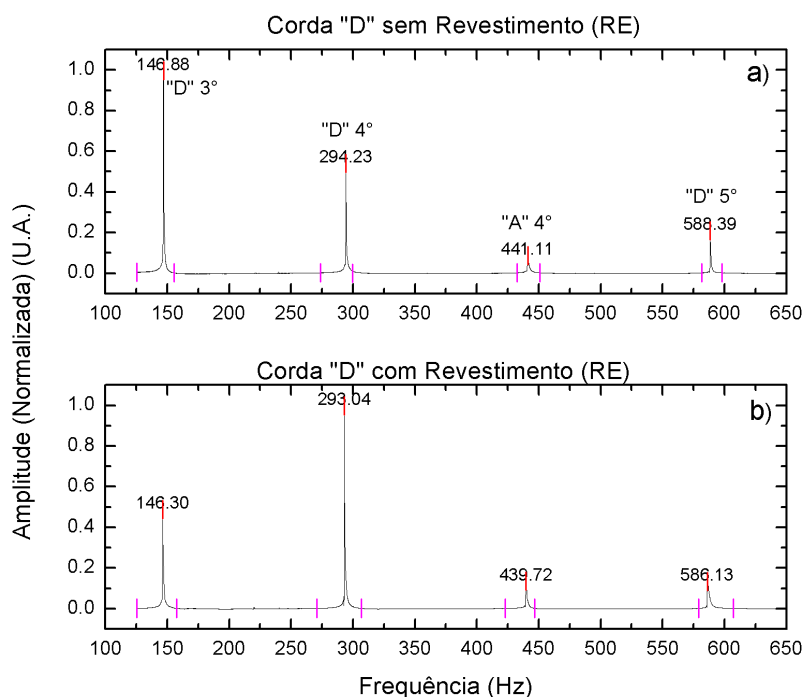
**Tabela 20.** Variação da tonalidade (frequências, fundamental e secundária) da corda "D" em relação à apresentada na tabela 6.

	"D" 3°	Diferença "D" 3° vs. Fn tabela 6	"D" 4°	Diferença "D" 4° vs. Fn tabela 6	"A" 4°	Diferença "A" 4° vs. Fn tabela 6	"D" 5°	Diferença "D" 5° vs. Fn tabela 6
	Hz							
frequência natural segun tabla. 6	146.83		293.67		440.00		587.33	
frequência natural Corda "D" sem Revestimento	146.88	0.05	294.23	0.56	441.11	1.11	588.39	1.06
frequência natural Corda "D" com Revestimento	146.30	0.53	293.04	0.63	439.72	0.28	586.13	1.20

Fonte: O autor

Aqui, da mesma forma que no caso anterior, também é visível que a corda revestida muda o timbre para uma oitava mais alta, lembrando primeiro que a frequência natural da corda revestida "D" 3° (146,83 Hz, de acordo com a Tabela 6) tem um valor de amplitude normalizado de metade do valor da corda não revestida, ao passo que, se observarmos o valor de "D" 4° (293,67 Hz, de acordo com a Tabela 6), podemos ver que o valor da corda revestida com DLC é quase o dobro do valor normalizado da corda não revestida. As outras duas frequências não apresentam alterações realmente significativas entre a corda sem revestimento e a corda com revestimento.

**Figura 48.** Na figura, temos dados de frequência para a corda "D" nas cordas sem revestimento (a) e com revestimento (b).



Fonte: Autor

#### 4.6.6 Corda “A”

Na

Figura 49, temos os dados de frequência da corda "A" das cordas sem revestimento (a) e com revestimento DLC (b). Nessa corda, assim como nas duas cordas anteriores "D" e "G", ocorre o mesmo fenômeno da corda revestida, ou seja, os valores das tonalidades (frequências) são de valores mais baixos do que os obtidos na corda sem revestimento, porém, a comparação será feita diretamente com os dados da Tabela 6, para observar as diferenças que podemos ver na Tabela 21.

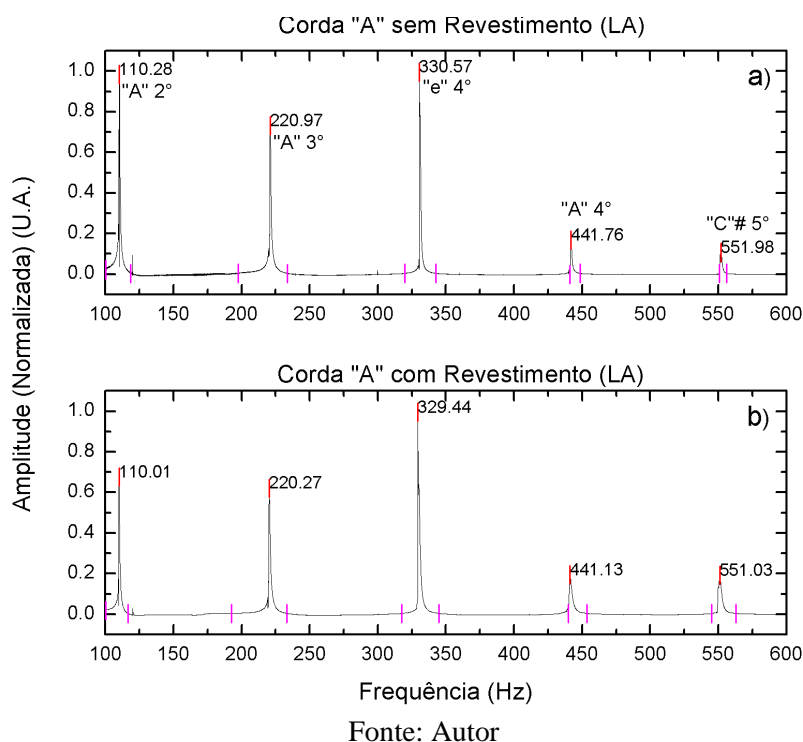
**Tabela 21.** Variação da tonalidade (frequências, fundamental e secundária) da corda "A" em relação à apresentada na Tabela 6.

	"A" 2°	Diferença "A" 2° vs. Fn tabela 6	"A" 3°	Diferença "A" 3° vs. Fn tabela 6	"e" 4°	Diferença "e" 4° vs. Fn tabela 6	"A" 4°	Diferença "A" 4° vs. Fn tabela 6	"C" # 5°	Diferença "C" # 5° vs. Fn tabela 6
	Hz									
frequência natural segue tabla. 6	110.00		220.00		329.63		440.00		554.36	
frequência natural Corda "A" sem Revestimento	110.28	0.28	220.97	0.97	330.57	0.94	441.76	1.76	551.98	2.38
frequência natural Corda "A" com Revestimento	110.01	0.01	220.27	0.27	329.44	0.19	441.13	1.13	551.03	3.33

Fonte: O autor

Agora, em termos de timbre da corda revestida em comparação com a corda não revestida, pode-se observar que a frequência natural de "A" 2° (110,00 Hz de acordo com a Tabela 6) da corda revestida tem 1/3 a menos de amplitude normalizada do que a da corda não revestida, que é a única frequência que tem uma variação significativa; as outras frequências da corda "A" não mudam.

**Figura 49.** Na figura, temos dados de frequência para a corda "A" nas cordas sem revestimento (a) e com revestimento (b).



#### 4.6.7 Corda "E"

Na Figura 50, temos os dados de frequência da corda "E" das cordas sem revestimento (a) e com revestimento DLC (b). Nessa corda como nas duas cordas anteriores "D", "G" e "A" ocorre o mesmo fenômeno da corda revestida, que os valores das tonalidades (frequências) são de valores menores do que os obtidos na corda sem revestimento, porém, a comparação será feita diretamente com os dados da Tabela 6, para observar as diferenças que poderemos observar na Tabela 22.

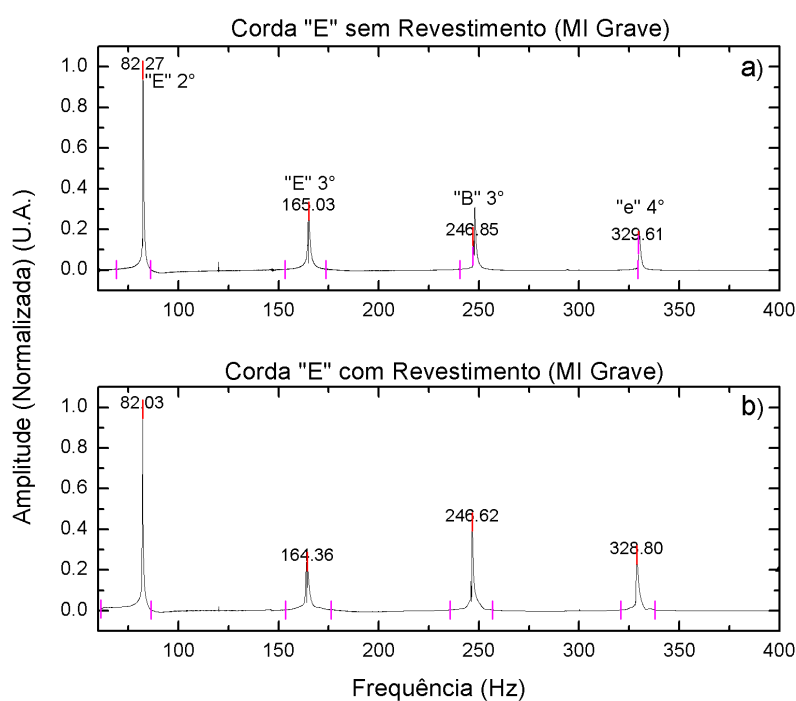
**Tabela 22.** Variação da tonalidade (frequências, fundamental e secundária) da corda "E" em relação à apresentada na tabela 6.

	"E" 2°	Diferença "E" 2° vs. Fn tabela 6	"E" 3°	Diferença "E" 3° vs. Fn tabela 6	"B" 3°	Diferença "B" 3° vs. Fn tabela 6	"e" 4°	Diferença "e" 4° vs. Fn tabela 6
	Hz							
frequência natural segue tabla. 6	82.41		164.81		246.94		329.63	
frequência natural Corda "E" sem Revestimento	82.27	0.14	165.03	0.22	246.85	0.09	329.61	0.02
frequência natural Corda "E" com Revestimento	82.03	0.38	164.36	0.45	246.62	0.32	328.80	0.83

Fonte: O autor

Agora, observando a última corda "E" na figura 50, podemos observar algo interessante em termos de timbre, pois a variação da amplitude normalizada das frequências das cordas com e sem revestimento não apresenta diferenças significativas que poderiam fazer com que o som dessa corda "E" no ar mudasse o suficiente; a única frequência que apresenta uma pequena variação em termos de amplitude normalizada é "B" 3° (246,94 Hz, de acordo com a Tabela 6), que é de longe 0,1 U.A. a mais.

**Figura 50.** Na figura, temos dados de frequência para a corda "E" nas cordas sem revestimento (a) e com revestimento (b).



Fonte: Autor

## 5 CONCLUSÃO

O conjunto de cordas de violão SG String (Extra Light - Nickel Wound) foi revestido pelo método PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition), levando em conta que o conjunto de cordas tem diferentes espessuras e formas e em conclusão, esta pesquisa buscou avaliar os efeitos do revestimento de Diamond-Like Carbon (DLC) em cordas de violão elétrico, com foco na durabilidade contra corrosão e nas propriedades sonoras das cordas. Foi observado que, em termos de resistência à corrosão, tanto as cordas revestidas quanto as não revestidas apresentaram desempenho semelhante, com variações na perda de massa que não foram significativas. Além disso, durante o processo de revestimento, foi necessário ajustar a receita padrão devido à presença de estanho nas cordas, o que afetou a adesão do DLC. A remoção da etapa de limpeza com argônio e o uso de silano e acetileno para revestimento melhoraram a adesão.

Em relação às propriedades sonoras, as cordas revestidas demonstraram ligeiras alterações nas frequências, resultando em um som mais agudo. Essas mudanças, embora detectáveis, estão dentro da faixa aceitável para músicos.

No entanto, é importante destacar que os resultados desta pesquisa foram obtidos com um conjunto específico de cordas e condições de revestimento. Outros tipos de cordas e ajustes no processo podem levar a resultados diferentes. Portanto, pesquisas futuras podem explorar ainda mais essa área para otimizar o processo de revestimento e entender melhor seus efeitos nas propriedades das cordas.

No geral, esta pesquisa contribuiu para o conhecimento sobre o uso de revestimentos DLC em cordas de violão elétrico, destacando sua viabilidade em termos de durabilidade e efeitos sonoros mínimos, desde que ajustes adequados sejam feitos durante o processo de revestimento.

## REFERÊNCIAS

- ALBELLA, J. M. **Láminas delgadas y recubrimientos: Preparación, propiedades y aplicaciones**. 1. ed. Madrid: Editorial CSIC, 2003. v. 1
- ALLEN, J. C. et al. **Strings for musical instruments**. Depositante: John C. AllenJohn E. BacinoChao ChuEdward J. DanielDean J. GambaleAlex R. HobsonPaul J. Zuk. EP1531454A2 Depósito: 27. out. 2004. Concessão: 26 dez. 2018.
- BAUMANN, C. A.; CRIST, B. D. Nickel allergy to orthopaedic implants: A review and case series. **Journal of Clinical Orthopaedics and Trauma**, v. 11, p. S596–S603, jul. 2020.
- BUBENZER, A. *et al.* rf-plasma deposited amorphous hydrogenated hard carbon thin films: Preparation, properties, and applications. **Journal of Applied Physics**, v. 54, n. 8, p. 4590–4595, ago. 1983.
- CALLISTER, W. **Ciência E Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2000.
- CASIRAGHI, C.; FERRARI, A. C.; ROBERTSON, J. Raman spectroscopy of hydrogenated amorphous carbons. **Physical Review B**, v. 72, n. 8, p. 085401, 1 ago. 2005.
- CATHERINE, Yves. Preparation techniques for diamond-like carbon. *In*: CLAUSING, Robert E. *et al.* (Eds.). **Diamond and Diamond-like Films and Coatings**. Boston, MA: Springer US, 1991. p. 193-227.
- CRANDALL, J. T.; CRANDALL, S. J. **Racket or musical instrument string with cured cationic lubricant between thermoplastic core and thermoplastics coating**. US4016714-A Depósito: 12 abr. 1977.
- D'ADDARIO, J. **Method for coating wire for a musical instrument string, and coated string**. Depositante: James D'Addario. US20060174745A1 Depósito: 10 ago. 2006.
- D'ADDARIO, J. **Metal-plated music string**. Depositante: D'ADDARIO, J. US009721544B2. Depósito: 1 ago. 2017.
- DOMINGO, A. M. **Apuntes de vibraciones y ondas**. Madrid: El autor, 2020.
- E HOME RECORDING STUDIO. **La Guía Definitiva de Cuerdas de Guitarra Acústica/Eléctrica**. Disponível em: <<https://es.ehomerecordingstudio.com/mejores-cuerdas-de-guitarra/>>. Acesso em: 2 nov. 2023.
- EDWARD, W. L. **Method for forming musical strings**. Depositante: Wackerle Lewis Edward. US2241283A. Depósito: 6 maio 1941.
- EVERLY, P. J. **Non-toxic chemical musical instrument string coating and preservative**. Depositante: Phillip Jason Everly. US007531730B2. Depósito: 12 maio 2009.

FERRARI, A. C.; ROBERTSON, J. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon. **Physical Review B**, v. 61, n. 20, p. 14095–14107, 15 maio 2000.

FERRARI, A. C.; ROBERTSON, J. Raman spectroscopy of amorphous, nanostructured, diamond-like carbon, and nanodiamond. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 362, n. 1824, p. 2477–2512, 15 nov. 2004.

FERRARI, A. C.; RODIL, S. E.; ROBERTSON, J. Interpretation of infrared and Raman spectra of amorphous carbon nitrides. **Physical Review B**, v. 67, n. 15, p. 155306, 9 abr. 2003.

FLETCHER, N. H.; ROSSING, T. D. **The physics of musical instruments**. [s.l.]: Springer Science & Business Media, 2012.

FRENCH, A. P. **Vibrations and Waves**. [s.l.]: CRC Press, 2017.

GENTIL, VICENTE. **Corrosa** 3. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1996.

GOSWAMI, R.; JANA, T.; RAY, S. Transparent polymer and diamond-like hydrogenated amorphous carbon thin films by PECVD technique. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 41, n. 15, p. 155413, 7 ago. 2008.

HEBESTREIT, C.; MYERS, D. **Strings for musical instruments**. Depositante: Charles Hebestreit, David Myers. US20070017334A1. Depósito: 25 jan. 2007.

JOLK, I. *et al.* **Musical instrument string and process for the production thereof**. Depositante: Feindrahtwerk Adolf Edelhoff GmbH & Co. KG, Iserlohn (DE). US008957293B2. Depósito: 17 fev. 2015.

JONES, T. **Coated Musical Instrument String**. Depositante: Terry Jones. US 20140041506A1. Depósito: 13 fev. 2014.

JONES, T. **Corrosion-resistant wound musical string**. Depositante: Terry Jones. US009424819 B1. Depósito: 23 ago. 2016.

KLANNER, F. **Musical String**. Depositante: Thomastik-Infeld Gesellschaft m.b.H. US 20100071529A1. Depósito: 1 set. 2005.

LAZARUS, A. **Method of extending useful life of instrument strings**. Depositante: Arnold Lazarus. US4539228A. Depósito: 3 set. 1985.

LIEBERMAN, M. A.; LICHTENBERG, A. J. Principles of plasma discharges and materials processing. **MRS Bulletin**, v. 30, n. 12, p. 899–901, 1994.

LONG, D. A. **The Raman Effect**. [s.l.]: Wiley, 2002.

MAJUMDAR, A. J.; DUBEY, N. Applications of inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry (ICP-OES) in impurity profiling of Pharmaceuticals. **International Journal of Pharmacy & Life Sciences**, v. 8, n. 1, 2017.

MARION, J. B.; COMA, J. V; FERRER, J. F. **Dinámica clásica de las partículas y sistemas**. [s.l.]: Reverte, 2014.

MARTÍN, J. M. A. **Introducción a la ciencia de materiales: Técnicas de preparación y caracterización**. [s.l.]: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 1993.

MIGUEI GARRIDO. **Guitarras Garrido Pozuelo**. [s.l.: s.n.], 1999.

MORI, H. *et al.* A case of systemic nickel allergy with diarrhea-predominant irritable bowel syndrome in which nickel intake restriction and administration of a probiotic formulation were effective. **Allergology International**, v. 70, n. 4, p. 515–516, out. 2021.

PARKER, A.; ROHRBACHER, P. J. **Musical instrument strings and method for making the same**. Depositante: Anthony Parker, Peter J. Rohrbacher. US6348646B1. Depósito: 19 fev. 2002.

PEREZ, N. **Electrochemistry and corrosion science**. [s.l.]: Springer, 2004.

POTTS, P. J.; WEBB, P. C. X-ray fluorescence spectrometry. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 44, n. 1–3, p. 251–296, jul. 1992.

RALLS, J. H. C. **String conditioning and preserving**. Depositante: Jr Harry C Ralls. US2892374A. Depósito: 30 jun. 1959.

RAMOS ALTAMIRA, I. **Historia de la guitarra y los guitarristas españoles**. 1. ed. San Vicente: Editorial Club Universitario, 2010.

ROBERTSON, J. Diamond-like amorphous carbon. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, v. 37, n. 4–6, 2002a.

ROBERTSON, J. Diamond-like amorphous carbon. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, v. 37, n. 4–6, p. 129–281, 24 maio 2002b.

SCHLESINGER, T. **Musical instrument strings with polymer treated surface**. Depositante: Schlesinger Todd Evan. US20040255751A. Depósito: 23 dez. 2004.

SODERMAN, A.; NYLOF, L. **Music string**. Depositante: Sandvik Intellectual Property AB. US20120315180A1. Depósito: 13 dez. 2012.

STONE, W. N.; FALCONE, A. S. **Method of making a wound musical instrument string**. Depositante: National Musical String Co. US4063674A. Depósito: 20 dez. 1977.

TONETTI, D. A. *et al.* Use of Pipeline Endovascular Device in Patients with Nickel Allergies. **World Neurosurgery**, v. 120, p. 349–351, dez. 2018.

TYLOR. **Wood and Steel**, n.2, 2023.

VOSOUGH, S.; SÖDERMAN, A. **String for musical instrument**. Depositante: Sandvik Intellectual Property. BRPI0618715A2. Depósito: 24 ago. 2010.

WILD, CH.; KOIDL, P. Structured ion energy distribution in radio frequency glow-discharge systems. **Applied Physics Letters**, v. 54, n. 6, p. 505–507, 6 fev. 1989.

ZAHID, R. *et al.* Effect of lubricant formulations on the tribological performance of self-mated doped DLC contacts: A review. **Tribology Letters**, v. 58, n. 2, 2015.

