

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS  
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

BRUNO DANIEL GONÇALVES

**LIBERAÇÃO DE NÍQUEL EM LIGAS DE AÇO NIQUELADO  
UTILIZADAS EM ENCORDAMENTOS DE GUITARRAS ELÉTRICAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA  
2017

BRUNO DANIEL GONÇALVES

**LIBERAÇÃO DE NÍQUEL EM LIGAS DE AÇO NIQUELADO  
UTILIZADAS EM ENCORDAMENTOS DE GUITARRAS ELÉTRICAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao departamento de Engenharia de materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof<sup>o</sup> Dr<sup>o</sup> Marcio Andreato Batista Mendes

LONDRINA  
2017



Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Campus Londrina



Coordenação de Engenharia de Materiais

---

## TERMO DE APROVAÇÃO

### **LIBERAÇÃO DE NÍQUEL EM LIGAS DE AÇO NIQUELADO UTILIZADAS EM ENCORDOAMENTOS DE GUITARRAS ELÉTRICAS**

por

**BRUNO DANIEL GONÇALVES**

Monografia apresentada no dia 30 de junho de 2017 ao Curso Superior de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus Londrina*. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho \_\_\_\_\_.

\_\_\_\_\_  
**Profa. Dra. Silvia Midori Higa**  
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

\_\_\_\_\_  
**Profa. Dra. Delia do Carmo Vieira**  
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Marcio Andreato Batista Mendes**  
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)  
**Orientador**

Observação: A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

\_\_\_\_\_  
**Profa. Dra. Delia do Carmo Vieira**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Prof. Marcio Andreato, meu orientador, pela paciência e ensinamentos ao longo dos últimos três anos.

À minha namorada, Nicoli, por se manter ao meu lado mesmo nos momentos mais difíceis, me dando força e incentivo para continuar.

Aos meus pais, Anita e Newton, por todo o apoio e por me darem condições de ter uma formação acadêmica de qualidade.

Aos meus amigos, pelo companheirismo e apoio.

Ao meu amigo, Felipe, pela ajuda moral e material.

Ao técnico do Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais, Filippe, pela ajuda e suporte na realização do trabalho.

Aos professores Edmilson Antonio Canesin e Alessandra Furtado pela ajuda e realização da espectrometria de absorção atômica.

Aos professores Carlos Cava, Silvia Higa e Délia Vieira pelas contribuições e sugestões durante as bancas.

## RESUMO

GONÇALVES, B. D. **Liberação de Níquel em Ligas de Aço Niquelado Utilizadas em Encordoamentos de Guitarras Elétricas**. 2017. 63 f. Trabalho de conclusão de curso – Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2017.

Existe um grande interesse na utilização do níquel devido a sua versatilidade, elevada resistência ao calor e elevada resistência à corrosão em uma grande amplitude de meios. Porém, a popularização de sua aplicação trouxe consequências devido ao seu potencial alergênico moderado. O níquel está presente em algumas das ligas mais populares utilizadas em encordoamentos de guitarras elétricas. Devido ao constante contato das cordas com a pele, isso pode trazer alguns riscos para a saúde dos usuários. O presente trabalho trouxe como objetivo a análise do uso de níquel nessa aplicação. A partir de experimentos que visam simular as condições de uso das cordas foi possível mensurar e avaliar a liberação de níquel. Soluções de suor artificial com características semelhantes ao suor fisiológico foram utilizadas para recriar essas condições. Com o auxílio de um espectrômetro de absorção atômica, a taxa de liberação de íons de níquel foi quantificada; e a partir de microscopia e metalografia, a corrosão e a estrutura das cordas foram observadas. Os resultados mostraram que ao tracionar as cordas e aplicar condições de ensaio semelhantes às de uso, a taxa de liberação de níquel aumentou consideravelmente, atingindo níveis que podem resultar em riscos para a saúde dos usuários.

**Palavras-chave:** Liberação de níquel. Encordoamentos de Guitarra. Corrosão em Aço Niquelado. Instrumentos Musicais.

## ABSTRACT

GONÇALVES, B. D. **Nickel Release in Nickel-Plated Steel Alloys Used in Electric Guitar Strings**. 2017. 63 f. Course conclusion work – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2017.

There is a great interest in nickel usage due to its versatility, high heat resistance and high corrosion resistance on a wide range of mediums. However, the popularization of its application brought consequences due to its moderated allergenic potential. The nickel is present in some of the most popular alloys used in electric guitar strings. Due to its constant contact with the skin, that can bring some risks to the user's health. The present work's objective was the analysis of nickel usage in this application. Through experiments that aimed to simulate the usage conditions of the strings, it was possible to measure and evaluate the nickel release. Artificial sweat solutions with similar characteristics to physiologic sweat were used to recreate those conditions. Using an atomic absorption spectrometer, the nickel release rate was quantified; and through microscopy and metallography, the corrosion and strings structure were observed. The results showed that when the strings are pulled and the test conditions are closer to the usage conditions, the nickel release rate increased considerably, reaching levels that can be dangerous to the user's health.

**Keywords:** Nickel release. Guitar Strings. Nickel-plated Steel Corrosion. Musical Instruments.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - ESQUEMATIZAÇÃO DE UMA GUITARRA ELÉTRICA. ....	14
FIGURA 2 - PRINCIPAIS PARTES DA GUITARRA ELÉTRICA QUE POSSUEM CONTATO DIRETO COM O ENCORDAMENTO. ....	15
FIGURA 3 - REPRESENTAÇÃO DE UMA CORDA DA MARCA D'ADDARIO. ....	16
FIGURA 4 - IMAGEM OBTIDA POR MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA DE UMA CORDA DA MARCA FENDER. ....	17
FIGURA 5 - AMOSTRAS A SEREM EMBUTIDAS AO LADO DOS PEDAÇOS DE CANO DE PVC. ....	27
FIGURA 6 - AMOSTRAS DURANTE O PROCESSO DE CURA DA RESINA.....	28
FIGURA 7 - AMOSTRAS EMBUTIDAS APÓS O LIXAMENTO E O POLIMENTO. .....	29
FIGURA 8 - APARATO ORGANIZADO PARA PRODUÇÃO DA SOLUÇÃO DE SUOR ARTIFICIAL E MEDIÇÃO DO PH. NA IMAGEM É POSSÍVEL OBSERVAR O AGITADOR MAGNÉTICO A ESQUERDA E O PHMETRO A DIREITA, COM SUA PONTEIRA DE LEITURA POSICIONADA DENTRO DO BÉQUER NO QUAL SE ENCONTRA A AMOSTRA. ....	30
FIGURA 9 - ARGOLAS NAS EXTREMIDADES DE CORDAS. ....	31
FIGURA 10 - TARRAXAS INSTALADAS E FIXADAS NO APARATO.....	32
FIGURA 11 - ESQUEMA DO RECIPIENTE PARA IMERSÃO DA CORDA EM SOLUÇÃO DE SUOR ARTIFICIAL.....	33
FIGURA 12 - TESTE DA CONFIGURAÇÃO UTILIZADA PARA O AJUSTE DA FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO DAS CORDAS.....	34
FIGURA 13 - SEÇÃO DO APARATO UTILIZADA PARA O POSICIONAMENTO DOS RECIPIENTES COM SOLUÇÃO DE SUOR ARTIFICIAL. ....	35
FIGURA 14 - SEÇÃO DO APARATO UTILIZADA PARA VERIFICAÇÃO E AJUSTE DA TENSÃO DAS CORDAS.....	35
FIGURA 15 - SEÇÃO LONGITUDINAL DA CORDA A5 DA MARCA A) CN B) EUA1 C) EUA2 E D) BR. ....	40
FIGURA 16 - SEÇÃO TRANSVERSAL DA CORDA A5 DA MARCA A) CN B) EUA1 C) EUA2 E D) BR. ....	41

FIGURA 17 – SEÇÃO LONGITUDINAL DA ESPIRAL DA CORDA DA MARCA CN COM DESTAQUE PARA A CAMADA DE PROTEÇÃO EM SUA SUPERFÍCIE.....	42
FIGURA 18 - SEÇÃO LONGITUDINAL DA ESPIRAL DA CORDA DA MARCA EUA2 COM DESTAQUE PARA A CAMADA DE PROTEÇÃO EM SUA SUPERFÍCIE.....	43
FIGURA 19 - SEÇÃO DA ESPIRAL DA CORDA DA MARCA EUA1.....	44
FIGURA 20 - SEÇÃO LONGITUDINAL DA CORDA A5 DA MARCA A) CN B) EUA1 C) EUA2 E D) BR. ....	45
FIGURA 21 - SEÇÃO LONGITUDINAL DA CORDA A5 DA MARCA A) CN B) EUA1 C) EUA2 E D) BR. ....	46
FIGURA 22 – CORDAS INSTALADAS NO APARATO E IMERSAS EM SOLUÇÃO DE SUOR ARTIFICIAL APÓS 24 HORAS.....	47
FIGURA 23 - CORDA DA MARCA BR APÓS SUA RUPTURA ENQUANTO IMERSA EM SUOR ARTIFICIAL E TRACIONADA NO APARATO. ...	48
FIGURA 24 - AMOSTRAS IMERGIDAS EM SOLUÇÃO DE SUOR ARTIFICIAL EM TUBOS DE ENSAIO.....	49
FIGURA 25 - IMAGEM OBTIDA NO ESTEREOSCÓPIO COM LUZ REFLETIDA DA CORDA A5 DA MARCA A) CN B) EUA1 C) EUA2 E D) BR. ....	50
FIGURA 26 - IMAGEM OBTIDA NO ESTEREOSCÓPIO COM LUZ TRANSMITIDA DA CORDA A5 DA MARCA A) CN B) EUA1 C) EUA2 E D) BR.....	50
FIGURA 27 - IMAGEM OBTIDA NO ESTEREOSCÓPIO COM LUZ REFLETIDA DA CORDA D4 DA MARCA CN APÓS A IMERSÃO EM TUBOS DE ENSAIO COM A SOLUÇÃO DE SUOR ARTIFICIAL SEM TRACIONAMENTO.....	51
FIGURA 28 - IMAGEM OBTIDA NO ESTEREOSCÓPIO COM LUZ REFLETIDA DA CORDA D4 DA MARCA CN APÓS A IMERSÃO TRACIONADA NO APARATO.....	52
FIGURA 29 - IMAGENS OBTIDAS NO ESTEREOSCÓPIO COM LUZ TRANSMITIDA DA CORDA D4 DA MARCA EUA2 APÓS A IMERSÃO TRACIONADA NO APARATO. ....	52



FIGURA 30 - IMAGEM OBTIDA NO ESTEREOSCÓPIO COM LUZ TRANSMITIDA DA CORDA D4 DA MARCA A) CN, B) EUA1 E C) EUA2 APÓS A IMERSÃO TRACIONADA NO APARATO. ....	53
FIGURA 31 - ESQUEMATIZAÇÃO DA ESPIRAL DE UMA CORDA. ....	54

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - DADOS DE CADA CORDA DE UM ENCORDOAMENTO D'ADDARIO EXL110.....	18
TABELA 2 - VALORES APROXIMADOS PARA A MÉDIA DE CADA COMPONENTE PRESENTE NO SUOR. ....	21
TABELA 3 - INFORMAÇÕES SOBRE OS REAGENTES UTILIZADOS PARA PRODUÇÃO DO SUOR ARTIFICIAL. ....	29
TABELA 4 - VALORES OBTIDOS A PARTIR DAS LEITURAS NO ESPECTRÔMETRO DE ABSORÇÃO ATÔMICA.....	53
TABELA 5 - MEDIDAS DA ESPIRAL DA CORDA.....	55
TABELA 6 - DIMENSÕES DAS CORDAS.....	56
TABELA 7 - RESULTADOS FINAIS DO EXPERIMENTO DE IMERSÃO EM SOLUÇÃO DE SUOR ARTIFICIAL.....	56

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	11
1.1	OBJETIVOS .....	12
1.1.1	Objetivo Geral .....	12
1.1.2	Objetivos Específicos.....	12
1.2	JUSTIFICATIVA .....	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO .....	14
2.1	A GUITARRA ELÉTRICA .....	14
2.1.1	Partes.....	14
2.1.2	Encordoamentos .....	15
2.2	NÍQUEL.....	18
2.2.1	Alergia ao Níquel .....	18
2.2.2	Diretriz do Níquel .....	20
2.2.3	Testes In Vitro de Liberação de Níquel em Suor Artificial .....	20
2.3	MÉTODOS ANALÍTICOS PARA DETECÇÃO DE NÍQUEL .....	23
2.3.1	Teste de Dimetilglioxima .....	23
2.3.2	Espectrometria de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente 24	
2.3.3	Espectrometria de Massa por Plasma Acoplado Indutivamente .....	24
2.3.4	Espectrometria de Absorção Atômica .....	24
3	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO DE PESQUISA .....	26
3.1	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA MICROSCOPIA .....	26
3.1.1	Embutimento das Amostras .....	27
3.1.2	Lixamento e Polimento das Amostras.....	28
3.2	IMERSÃO DAS AMOSTRAS .....	29
3.2.1	Preparação da Solução de Suor Artificial.....	29
3.2.2	Construção do Aparato .....	31
3.2.3	Início da Imersão .....	33
3.3	CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS .....	36
3.3.1	Microscopia Óptica.....	36
3.3.2	Espectrometria de Absorção Atômica .....	37
3.3.3	Estereoscopia .....	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
4.1	MICROSCOPIA ÓPTICA .....	39
4.2	IMERSÃO EM SOLUÇÃO DE SUOR ARTIFICIAL .....	46
4.3	ESTEREOSCOPIA.....	49
4.3.1	Cordas Antes da Imersão em Solução de Suor Artificial.....	49
4.3.2	Cordas Após a Imersão em Solução de Suor Artificial.....	51
4.4	ESPECTROMETRIA DE ABSORÇÃO ATÔMICA.....	53
4.4.1	Cálculo da Área Superficial.....	54
4.5	LIBERAÇÃO DE NÍQUEL .....	56
5	CONCLUSÕES .....	59
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	59
	REFERÊNCIAS.....	60

## 1 INTRODUÇÃO

A guitarra elétrica é atualmente um dos instrumentos musicais mais populares. Sua história começa no início do século passado, porém sua estrutura é baseada em séculos de tradição. Uma tradição tão grande muitas vezes tem seu preço, e esse é o caso. Inovações muito ousadas não costumam ser muito bem-vindas, o que dificulta o trabalho dos engenheiros nas tentativas de otimizar a fabricação. Desde as madeiras usadas na construção do corpo até a liga utilizada nas cordas, tudo deve trabalhar em harmonia para manter o timbre há tantas décadas consagrado. Até mesmo as válvulas dos amplificadores ainda possuem papel fundamental nessa sonoridade, mesmo após o aperfeiçoamento dos transistores.

Nas décadas de 1950 e 1960 o timbre era marcado pelas cordas de níquel em guitarras de corpo oco. Com o tempo alguns aços começaram a ser implementados para melhorar a resistência dos encordoamentos, e as guitarras começaram a ser sólidas para resolver problemas com microfonia. Tudo isso deu origem à uma sonoridade mais moderna com materiais mais eficientes, o que permitiu uma maior liberdade na fabricação. O níquel ainda está presente, tanto em encordoamentos de níquel que recriam os timbres antigos, como em encordoamentos de aço niquelado, que são os mais utilizados e trazem um bom equilíbrio entre sonoridade e resistência.

Apesar de suas propriedades vantajosas, principalmente sua resistência a corrosão, o níquel traz alguns problemas em sua utilização. Sua popularização gerou um grande aumento de pessoas com algum tipo de alergia a esse metal. A liberação de íons durante o contato pode acarretar uma sensibilização ao níquel até mesmo em indivíduos que nunca tiveram nenhuma reação ao metal previamente. E após a ocorrência dessa sensibilidade, fica difícil seu tratamento, já que é praticamente impossível se evitar o contato com níquel no cotidiano.

A União Europeia já alocou esforços para diminuir o problema criando em 1994 uma diretiva com normas e testes a serem feitos em produtos do mercado europeu que contenham níquel. Essas regras definem limites de liberação de níquel durante o uso para que o comércio do produto seja aprovado.

Em vista disso, neste trabalho foi proposto o estudo da liberação de níquel em cordas de aço niquelado submersas em soluções de suor artificial, que visam simular as condições de uso da corda em contato com a pele.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Recriar as condições de uso de encordoamentos de aço com espiral niquelada para guitarras elétricas e estudar a liberação de íons prejudiciais à saúde.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Identificar as condições a que a corda está submetida durante o uso;
- Projetar e construir um aparato para recriar as condições de uso;
- Verificar a liberação de íons que ocorre durante o uso;
- Analisar os fatores que podem vir a interferir na liberação de níquel.

## **1.2 JUSTIFICATIVA**

O engenheiro de materiais tem a liberdade de explorar uma quantidade muito grande de materiais e processamentos. Seu conhecimento amplo sobre os diversos campos da ciência dos materiais o permite trabalhar com grande eficiência em busca da melhor performance na aplicação desejada. Porém deve-se também levar em consideração os efeitos que um material ou combinação de materiais terão no usuário. O níquel é um dos elementos que merecem grande atenção nesse quesito, já que é um potencial causador de problemas de saúde, como dermatite de contato e sensibilidade ao níquel, principalmente em aplicações que estarão em contato direto com a pele do usuário, como as cordas de instrumentos musicais. Existe uma norma europeia para o controle do uso de níquel em diversas aplicações, o que deve ser levado em consideração mesmo em regiões fora do alcance desta norma (HOSTYNEK; MAIBACH, 2002).

Portanto, este trabalho se justifica devido ao esforço na análise de ligas de encordoamentos e às propostas para redução na liberação de níquel em ligas que

trabalham em contato direto com o corpo; além disso, incentivar a discussão sobre os impactos causados pelos materiais em suas aplicações e que pode gerar novos trabalhos acerca do assunto dentro do curso.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 A GUITARRA ELÉTRICA

A guitarra elétrica se tornou uma parte importante da cultura contemporânea. Uma série de mudanças tecnológicas nas guitarras tradicionais as transformaram nesse novo instrumento muito mais versátil com uma sonoridade única. A luta contra os ruídos e distorções causados pela tecnologia primitiva cessou e esses “defeitos” passaram a ser usados para a formação da sonoridade que impulsionou gerações. A imagem que se tinha da guitarra como um mero instrumento de acompanhamento agora se transforma na imagem de um ícone eternizado por estilos musicais como o *blues* e o *rock’n’roll*, um símbolo de poder e rebelião (OSTBERG; HARTMANN, 2015).

#### 2.1.1 Partes

Tradicionalmente a guitarra elétrica é um instrumento de madeira de 6 ou 12 cordas que pode ser dividido em três seções, como mostra a Figura 1.

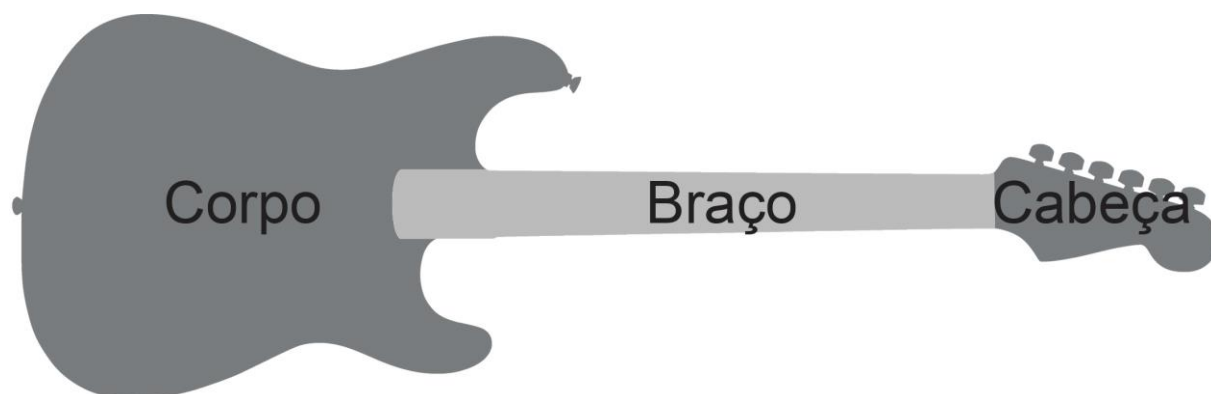


Figura 1 - Esquematização de uma guitarra elétrica.  
Fonte: Autoria própria.

A Figura 2 identifica algumas partes do instrumento que possuem direta interação com as cordas.

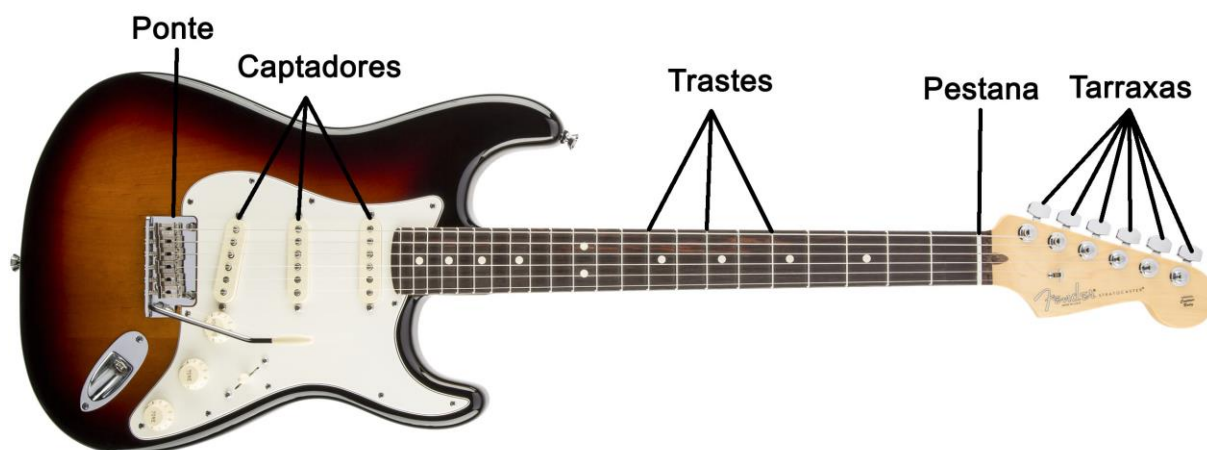


Figura 2 - Principais partes da guitarra elétrica que possuem contato direto com o encordoamento.  
 Fonte: Adaptado de Fender Musical Instruments Corporation, [s.d.].

A ponte e as tarraxas servem para a fixação das cordas, sendo que a ponte é fixa e o tensionamento de cada corda é ajustado pela rotação da tarraxa correspondente. A pestana é uma base para que a corda tenha liberdade de vibração apenas entre ela e a ponte. Ao pressionar a corda contra um dos trastes a liberdade da corda é limitada entre ele e a ponte, conseqüentemente alterando a frequência de vibração. Os captadores atuam captando a vibração das cordas para que o som possa então ser amplificado por equipamentos externos.

A captação da vibração se dá pela lei de Faraday, que determina que a mudança de fluxo em um circuito elétrico induz a uma força eletromagnética, e mudanças em um campo magnético atuam nas cargas elétricas. O captador é um ímã enrolado por uma bobina que pode ter de 4.000 a 7.000 voltas. A vibração da corda perto do ímã ocasiona um distúrbio no campo magnético que gera um sinal elétrico que é enviado para um amplificador (WALKER, 2001).

### 2.1.2 Encordoamentos

O encordoamento é um dos principais elementos de um instrumento musical. As cordas são responsáveis pela vibração que gera o som. A forma como o material vibra e sua interação com os ímãs dos captadores são características fundamentais para a sonoridade da guitarra. Portanto, o controle da composição das ligas afeta o timbre do instrumento (D'ADDARIO, [s.d.]).

A maioria das guitarras elétricas possui 6 cordas ao todo, sendo que as 3 cordas mais finas possuem apenas o núcleo, e as 3 cordas mais espessas possuem



um núcleo com uma espiral em volta. As espessuras das 6 cordas são diferentes entre si, sendo que as de maior espessura são utilizadas para gerar notas mais graves. A Figura 3 mostra uma corda da marca D'Addario. Algumas peculiaridades desse modelo são o formato hexagonal do núcleo e o fino recobrimento sobre a espiral. Segundo D'Addario ([s.d.]), ao utilizar um aço de alto carbono no formato hexagonal, o ancoramento entre as camadas é melhorado, aumentando a consistência no som. Já o fino recobrimento transparente tem o intuito de proteger a corda contra a corrosão e aumentar sua vida útil (D'ADDARIO, [s.d.]).

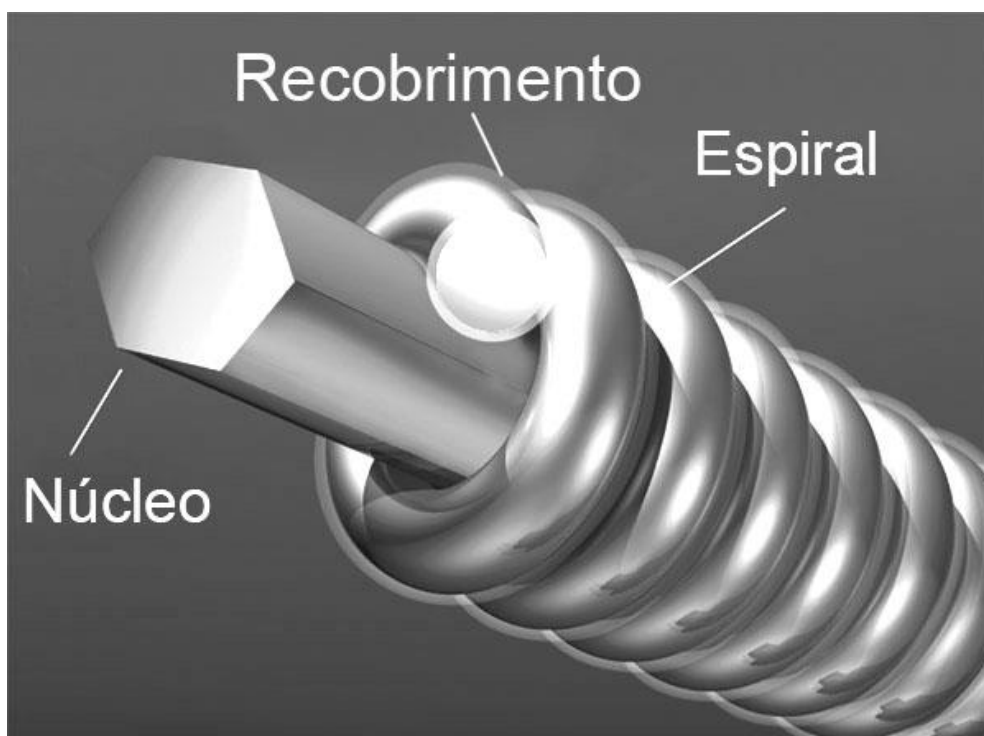


Figura 3 - Representação de uma corda da marca D'Addario.  
Fonte: Adaptado de D'Addario ([s.d.]).

A Figura 4 apresenta duas imagens de uma corda da marca Fender modelo *Nickel-Plated Steel* que possui recobrimento de níquel na espiral. Observa-se que esse modelo já possui o núcleo no formato cilíndrico.

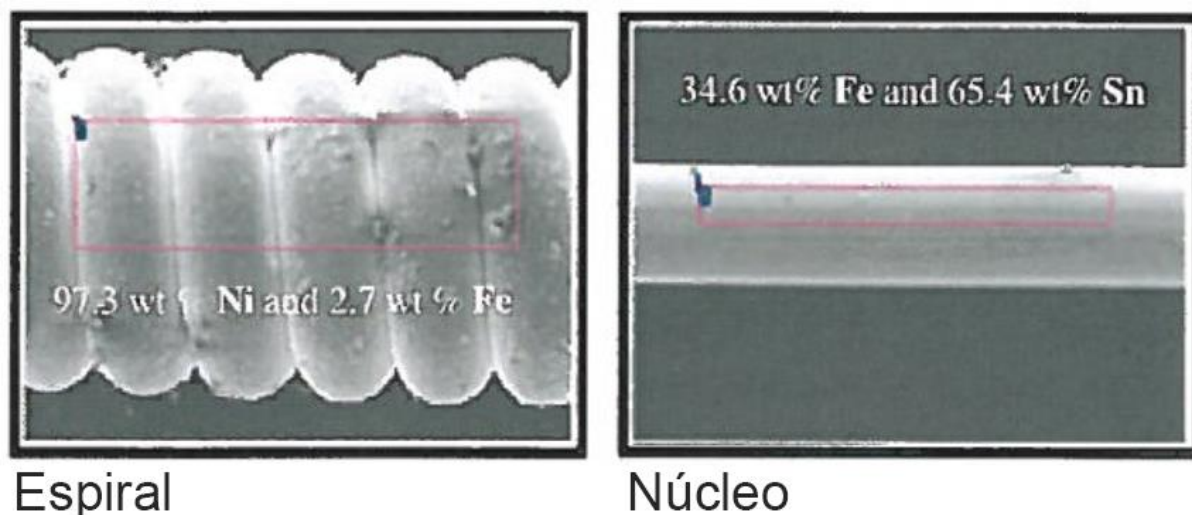


Figura 4 - Imagem obtida por microscópio eletrônico de varredura de uma corda da marca Fender.  
Fonte: Adaptado de Friis et al. (2012).

Existem várias combinações de espessuras que podem ser usadas em um encordoamento. No Brasil este normalmente é definido pelo diâmetro da sua corda mais fina em polegadas. Os mais comuns são os jogos de corda 0,008, 0,009, 0,010, 0,011 e 0,012, que na nomenclatura internacional correspondem respectivamente a extra super leve, super leve, leve regular, médio e pesado (D'ADDARIO, [s.d.]).

Cordas com diferentes composições precisam de diferentes forças de tração para vibrarem na mesma frequência, mesmo que possuam o mesmo diâmetro. O comprimento da escala é definido pela distância entre os apoios fixos da corda (a ponte e a pestana), e pode variar entre instrumentos. Quanto maior a escala, maior a força necessária para atingir a mesma vibração. A equação (1) relaciona a força (F) em libras com a massa unitária da corda (MU) em lb/pol, o comprimento da escala (CE) em polegadas, e a frequência desejada (FR) em hertz. Os valores de massa unitária e comprimento da escala podem ser medidos, porém normalmente são informados pelo fabricante (D'ADDARIO, 2009).

$$F = ( MU * ( 2 * CE * FR )^2 ) / 386,4 \quad (1)$$

Na Tabela 1 estão listados os dados das cordas individuais do jogo de cordas modelo EXL110 da marca D'Addario®, que é classificada como leve regular e sua corda mais fina possui diâmetro de 0,010 polegadas. Para o cálculo das forças considerou-se um comprimento de escala de 25 1/2 polegadas, que é o utilizado mais comumente em guitarras elétricas.

Tabela 1 - Dados de cada corda de um encordoamento D'Addario EXL110.

<b>Corda</b>	<b>Nota</b>	<b>Diâmetro (mm)</b>	<b>Força (kg)</b>
E1	Mi	0,2500	7,360
B2	Si	0,3300	6,980
G3	Sol	0,4300	7,520
D4	Ré	0,6604	8,340
A5	Lá	0,9144	8,640
E6	Mi	1,1684	7,670

Fonte: D'Addario ([s.d.]).

## **2.2 NÍQUEL**

O uso do níquel em ligas data do surgimento das civilizações. Muitos artefatos, como armas, ferramentas e moedas, utilizados por povos antigos o apresentavam em sua composição em diferentes proporções. Este metal possui significativas contribuições até hoje, tanto na sua forma elementar quanto em ligas, além de apresentar grande potencial para futuras aplicações. Suas grandes vantagens são a versatilidade, elevada resistência ao calor e elevada resistência à corrosão em uma grande amplitude de meios. É capaz de formar ligas com a maioria dos metais, incluindo a completa solução sólida de níquel e cobre. Comercialmente o níquel e suas ligas são utilizados com estrutura completamente austenítica (ASM INTERNATIONAL HANDBOOK, 1990).

### **2.2.1 Alergia ao Níquel**

O constante aumento do uso de níquel nas mais diversas aplicações tem trazido alguns malefícios para a sociedade. Sua presença em ferramentas e artigos cotidianos oferecem riscos para os usuários, pois este metal é considerado um alergênico de potencial moderado, e a exposição frequente através da pele, membranas mucosas, dieta, inalação e implantes pode levar ao desenvolvimento de dermatite de contato e sensibilidade ao níquel. Algumas normas europeias já foram criadas para reduzir o problema regulando a quantidade máxima permitida de níquel

em produtos que possuem contato prolongado com a pele (HOSTYNEK; MAIBACH, 2002).

Os primeiros casos de dermatite por níquel causados por artigos do cotidiano foram registrados em 1930. Na década de 50 o problema havia se espalhado e se tornado alvo de estudos. Em 1979 já estimava-se que cerca de 13% das pessoas de 20 a 29 anos apresentavam hipersensibilidade ao níquel (PELTONEN, 1979). Os dados indicam que as mulheres são as mais afetadas (HOSTYNEK; MAIBACH, 2002).

Um estudo mais recente feito por Rodrigues (2013) na clínica dermatológica da Santa Casa de Belo Horizonte analisou o resultado do teste de contato em 125 crianças e adolescentes de 1 a 19 anos. Esse teste tem como objetivo identificar qual alérgeno está causando a dermatite de contato. Uma reação imunológica ocorre quando a pele do indivíduo entra em contato com uma substância a qual ele já foi sensibilizado previamente, e analisando esse resultado pode ser feito o prognóstico. Dos 125 pacientes, 74 apresentaram pelo menos uma reação positiva. A substância que apresentou maior frequência de sensibilização foi o níquel, trazendo resultado positivo em 36,8% dos pacientes. Essa porcentagem representada o dobro da segunda substância com mais frequência, o thimerosal, que gerou resposta imunológica em 18,4% dos pacientes.

Embora o exame de contato possa trazer um prognóstico rápido e barato, é muito difícil se livrar do problema devido à grande presença do níquel no cotidiano em ferramentas, alimentos, objetos de uso diário e até mesmo no ar urbano (HOSTYNEK; MAIBACH, 2002). Segundo Fournier, Govers e Brun (2003), a manipulação de algumas centenas de moedas de 1 ou 2 euros já liberariam uma quantidade suficiente de níquel para causar uma reação alérgica, o que poderia ser evitado removendo-se esse metal desses artefatos.

Os estudos relacionados a penetração do níquel na pele mostram que ele é um penetrante fraco com uma constante de difusão de  $10^{-7}$  a  $10^{-4}$  cm/h em sua forma iônica. Porém, isso gera um paradoxo já que na prática os íons apresentam imediata absorção na pele. Algumas evidências demonstram que isso deve-se ao fato de que ocorre a imediata dissolução do níquel metálico quando em contato com a pele humana e seus exsudatos, como o suor por exemplo, formando sabões de níquel potencialmente mais difusíveis (HOSTYNEK; MAIBACH, 2002).

### 2.2.2 Diretriz do Níquel

Quando se trata de combate à alergia ao níquel a Europa toma a frente com diretrizes elaboradas para diminuir o máximo possível o problema. A primeira diretriz da União Europeia foi a EN 1811, que foi adotada em 1994 pelo conselho e pelo parlamento europeu. Após essa medida, notou-se uma significativa queda na frequência de alergia ao níquel; porém, após 2002, estudos mostraram uma estagnação nessa taxa. Há duas possíveis razões para isso: 1) inconsistência entre valores medidos e os valores reais de liberação de níquel e 2) produtos em não conformidades com a diretriz. Num primeiro momento, a regra focava na porcentagem de níquel da amostra que era limitada a 0,05%. Em 2004 houve o primeiro reforço à diretriz que agora, ao invés de considerar a porcentagem de níquel presente no produto, passava a considerar a quantidade de níquel que era liberada durante o uso. O limite imposto para essa liberação foi de 0,5  $\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{semana}$  para itens gerais e 0,2  $\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{semana}$  para objetos inseridos no corpo, como brincos e *piercings*. Em 2011 foi criada uma nova emenda inserindo intervalos de incerteza para os testes laboratoriais que entrou em vigor a partir de 1 de abril de 2013. Embora os limites visem prevenir a manifestação de dermatite de contato na maioria dos indivíduos sensibilizados, alguns indivíduos alérgicos ao níquel podem demonstrar reações em níveis muito mais baixos dos que os impostos, de até mesmo 0,05  $\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{semana}$  (SCHNUCH; SCHWITULLA, 2013).

### 2.2.3 Testes *In Vitro* de Liberação de Níquel em Suor Artificial

Um dos grandes desafios para os testes de liberação de níquel em amostras é a reprodução artificial do suor. Diversos fatores podem afetar a composição e o pH do fluido. O gênero da pessoa possui grande influência sobre isso e a taxa de secreção de suor afeta consideravelmente sua composição devido aos mecanismos biológicos (HOSTYNEK; MAIBACH, 2002). A Tabela 2 apresenta valores aproximados da média da quantidade de cada componente no suor.

Tabela 2 - Valores aproximados para a média de cada componente presente no suor.

<b>Componente</b>	<b>Gênero</b>	<b>Quantidade média presente no suor</b>
Sódio	Homens	51,9 mEq/L
	Mulheres	36,5 mEq/L
Potássio	Homens	7,5 mEq/L
	Mulheres	10,0 mEq/L
Cloreto	Ambos	29,7 mEq/L
Uréia	Ambos	260 – 1220 mg/L
Ácido láctico	Ambos	360 – 3600 mg/L
Aminoácidos	Ambos	270 – 2590 mg/L
Amônia	Ambos	60 – 110 mg/L

Fonte: Hostynek e Maibach (2002).

Existem indivíduos, chamados de informalmente de “enferrujadores”, que transpiram pelas mãos em taxas anormalmente altas e o suor secretado possui baixo pH. A consequência disso é a corrosão acentuada de superfícies metálicas que entram em contato com sua pele (HOSTYNEK; MAIBACH, 2002).

Para evitar variações em experimentos, a norma EN 1811 padronizou uma solução de suor artificial composta de 0,5% de cloreto de sódio, 0,1% de ácido láctico, 0,1% de uréia e adição de amônio para o ajuste do pH para 6,5 (BOCCA et al., 2007; FRIIS et al., 2012; LIDIJA; UJEVIC, 2009; MILOŠEV; KOSEC, 2007a, 2007b; ROLICH; REZIC, 2010). Porém essas condições podem não ser consideradas severas o suficiente para resultados seguros. Por isso alguns trabalhos utilizam uma solução com o pH 4,5, considerado o menor pH encontrado em suor fisiológico. A composição do suor artificial utilizada nestes trabalhos é de 0,3% de cloreto de sódio, 0,1% de sulfato de sódio, 0,2% de uréia e 0,2% de ácido láctico (HAUDRECHY et al., 1993; HEMINGWAY; MOLOKHIA, 1986).

Um experimento conduzido em cordas da marca D’Addario®, seguindo as normas da diretriz EN 1811, resultou em cerca 0,044  $\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{semana}$  de níquel liberado (LIDIJA; UJEVIC, 2009). O Gráfico 1 e o Gráfico 2 mostram resultados mais detalhados sobre a liberação de íons de diversos elementos durante o experimento.

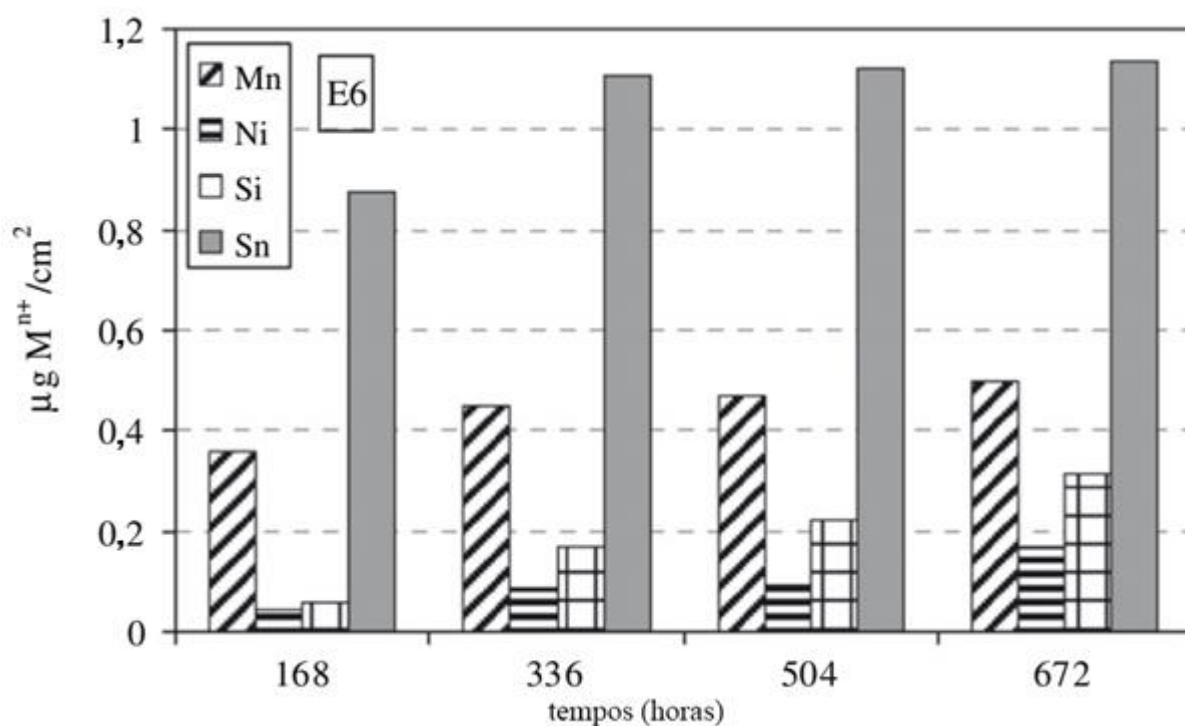


Gráfico 1 - Quantidade de íons de cada elemento dissolvidos pela imersão de uma corda E6 em suor artificial em função do tempo.  
Fonte: Adaptado de Lidija e Ujevic (2009).

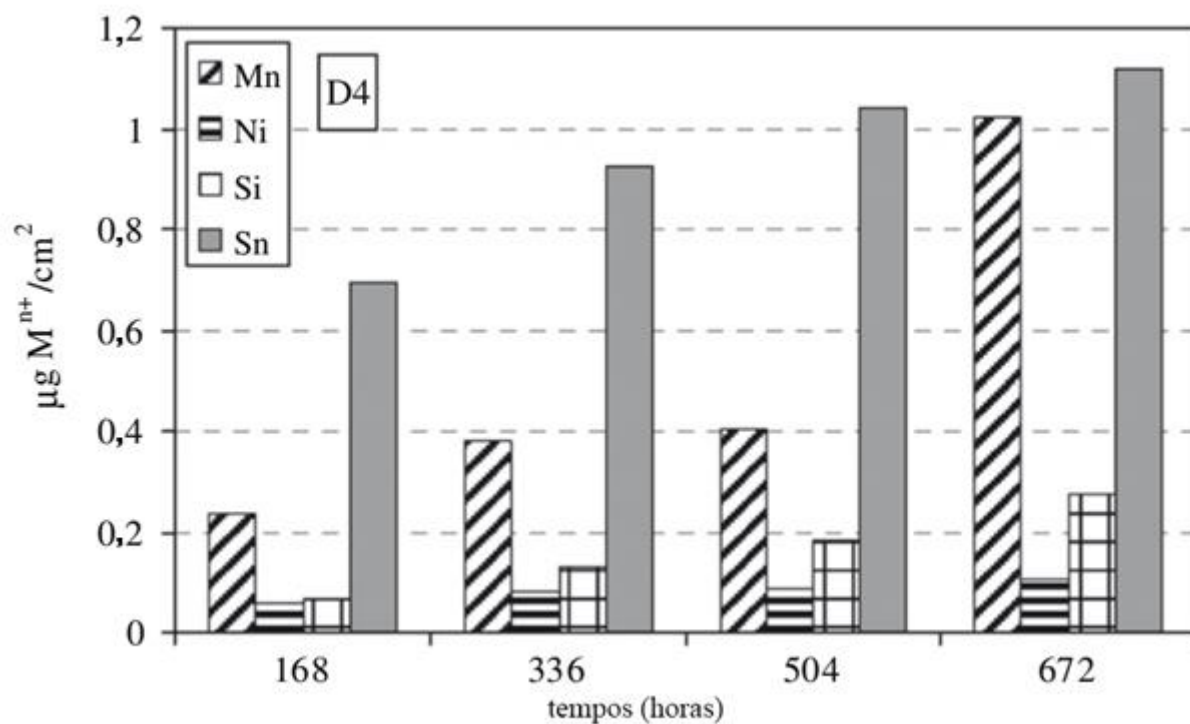


Gráfico 2 - Quantidade de íons de cada elemento dissolvidos pela imersão de uma corda D4 em suor artificial em função do tempo.  
Fonte: Adaptado de Lidija e Ujevic (2009).

Friis et al. (2012) realizaram um estudo de caso sobre um homem de 54 anos que trabalhava com manufatura e venda de guitarras, além de tocar profissionalmente em uma banda, e desenvolveu eczema nas pontas dos dedos que entram em contato direto com as cordas. Os experimentos seguiram as normas da diretriz EN 1811 em um jogo de cordas da marca Fender<sup>®</sup>, porém em um primeiro teste a liberação de níquel foi abaixo dos limites de detecção do espectrômetro de absorção atômica utilizado. Para contornar o problema, a solução de suor artificial teve seu pH alterado para 4,8 e a espiral da corda foi separada do núcleo e analisada por si só. Os experimentos mostraram uma liberação de níquel de 101  $\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{semana}$ . Assume-se que esse aumento se deve principalmente à retirada da proteção catódica que era fornecida pelo ferro e zinco presentes no núcleo da corda. Além disso a modificação no pH exerce grande influência nos resultados.

## **2.3 MÉTODOS ANALÍTICOS PARA DETECÇÃO DE NÍQUEL**

A seguir são descritas as características dos métodos analíticos mais comuns para a detecção de níquel em amostras.

### **2.3.1 Teste de Dimetilglioxima**

O teste de dimetilglioxima é um método químico colorimétrico para se detectar e medir a presença de níquel na superfície de uma amostra com uma precisão de até 10 ppm (0,001% ou 2,1  $\mu\text{g Ni/g}$ ). Em uma solução de amônia ocorre a complexação dos íons níquel (II) com o dimetilglioxima resultando em uma solução ou precipitado rosa. Falsos positivos podem ocorrer pela reação de íons de prata, manganês, ferro ou cobalto com o dimetilglioxima, sendo que, para evita-los adiciona-se peróxido de hidrogênio. Já os falsos negativos podem ser evitados realizando um ataque químico na amostra eliminando possíveis camadas passivadoras; porém isso pode revelar presença de níquel em partes que não estariam em contato com a pele normalmente. O teste de dimetilglioxima, embora muito útil e de fácil realização, não deve ter seu resultado tomado como definitivo, pois mesmo materiais com resultados negativos podem induzir a sensibilização do indivíduo ao níquel após o uso prolongado (HOSTYNEK; MAIBACH, 2002).



### **2.3.2 Espectrometria de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente**

A partir da interação de um campo de radiofrequências com gás argônio ionizado é feita a ionização dos elementos de um plasma acoplado indutivamente e dos cátions de uma amostra. Após o plasma ser formado, os íons conseguem absorver energia o suficiente de uma fonte externa para que seja mantida a temperatura e, por subseqüentes ionizações, o estado de plasma. Os átomos e íons da amostra são transformados em um aerossol e dentro do equipamento passam para um estado instável de energia ao atingir 6000 °C e, ao retornarem ao estado original, emitem luz em um comprimento de onda e intensidade característicos. A partir disso podem ser feitas medições da luz emitida para a detecção de elementos. O limite atual para a detecção de níquel se encontra entre 5 a 10 ppb ( $\mu\text{g/L}$ ) (HOSTYNEK; MAIBACH, 2002; SKOOG; HOLLER; CROUCH, 2007).

### **2.3.3 Espectrometria de Massa por Plasma Acoplado Indutivamente**

Esse método apresenta algumas vantagens como baixos limites de detecção, alto grau de seletividade e boa precisão e exatidão. Uma tocha de plasma acoplado indutivamente serve como atomizador e ionizador. A solução a ser analisada é nebulizada e seu transporte é feito por gás argônio para a tocha de plasma. Os íons são introduzidos em um espectrômetro de massa quadrupolo e então são separados de acordo com sua razão de massa para carga e quantificados (HOSTYNEK; MAIBACH, 2002; SKOOG; HOLLER; CROUCH, 2007).

### **2.3.4 Espectrometria de Absorção Atômica**

Esse é o método mais usado para determinação de elementos simples em amostras, e tem sido assim há mais de meio século. As energias de transição eletrônicas são bem específicas para cada elemento e a faixa de absorção atômica é relativamente estreita, portanto esse método possui alta especificidade. O equipamento de análise consiste em uma fonte de radiação, um porta amostra, um seletor de comprimento de onda, um detector, um processador de sinal e um dispositivo para leitura. Os meios mais comuns de atomização da amostra são chama e eletrotérmico (SKOOG; HOLLER; CROUCH, 2007). Após a atomização, os átomos

livres absorvem radiação da fonte que trabalha com uma emissão característica que depende do elemento a ser analisado. Isso causa a transição de elétrons para orbitais vazios para níveis mais altos de energia. A atenuação da radiação ocorrida é então medida pelo detector que converte essa variação em um sinal de absorbância (HOSTYNEK; MAIBACH, 2002). Os limites de detecção de níquel são de 3  $\mu\text{g/L}$  utilizando o atomizador de chama e 0,5  $\mu\text{g/L}$  para um atomizador eletrotérmico (SKOOG; HOLLER; CROUCH, 2007).

### 3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO DE PESQUISA

Foram selecionados quatro jogos de cordas de quatro marcas diferentes para os experimentos. Todos possuem a mesma combinação de diâmetro de cordas correspondentes a um jogo padrão de cordas leve regular, como é possível verificar na Tabela 1. Os quatro encordoamentos possuem cordas de aço com revestimento niquelado em sua espiral. A escolha se baseou em preço, popularidade e origem, buscando abranger uma boa variedade de modelos sem variações nas dimensões e composição das cordas. O Quadro 1 relaciona os encordoamentos escolhidos. As faixas de preço apresentadas correspondem apenas ao preço relativo entre os modelos citados. As marcas foram substituídas por siglas relacionadas a sua origem.

Marca	Origem	Faixa de Preço
CN	China	◆◆◆◆
BR	Brasil	◆◆◆◆
EUA1	Estados Unidos	◆◆◆◆
EUA2	Estados Unidos	◆◆◆◆

Quadro 1 - Dados dos modelos de cordas escolhidos para análise.  
Fonte: Autoria própria.

A corda A5 de cada jogo foi embutida e analisada por microscopia óptica. Já a corda D4 foi submetida a imersão em uma solução de suor artificial em tubos de ensaio e também em um aparato que buscou recriar as condições de uso das mesmas. A escolha da corda para cada aplicação não seguiu nenhum critério específico. Devido ao cálculo da liberação ser relativo a área superficial, o resultado final não seria alterado pela mudança da corda utilizada. Para o estudo da liberação de níquel a solução resultante foi analisada por espectrometria de absorção atômica.

#### 3.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA MICROSCOPIA

Para que fosse possível uma análise mais detalhada acerca dos encordoamentos, algumas amostras foram embutidas em resina e tiveram sua superfície preparada para microscopia óptica.

### 3.1.1 Embutimento das Amostras

Foram cortados dois pedaços da corda A5 (vide Tabela 1) de cada encordoamento, quatro seções de um cano de policloreto de polivinila (PVC), e quatro partes de um suporte para o embutimento das amostras. A Figura 5 mostra as amostras ao lado dos pedaços do cano de PVC.

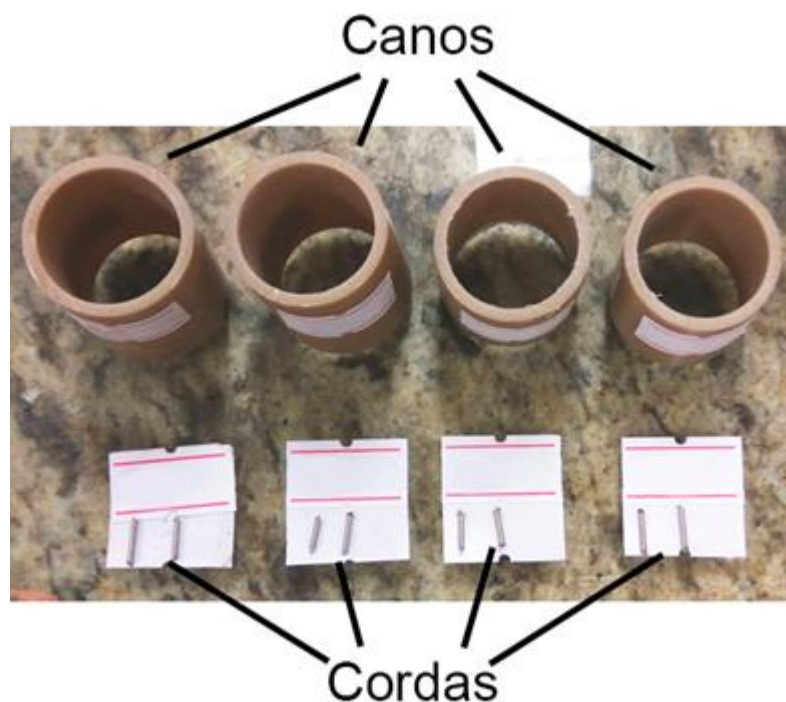


Figura 5 - Amostras a serem embutidas ao lado dos pedaços de cano de PVC.

Fonte: Autoria própria.

As amostras foram coladas na lateral dos suportes para que não se movimentassem durante o despejo da resina. Para que fosse possível a análise das seções transversal e longitudinal das cordas, uma das amostras de cada encordoamento foi colada na horizontal e a outra na vertical. A amostra colada horizontalmente foi posicionada na metade da altura da amostra vertical, para que o plano longitudinal a ser analisado da primeira coincidissem em altura com um plano transversal da segunda que estivesse afastado de suas extremidades, as quais foram afetadas durante o processo de corte. O conjunto foi então posicionado dentro dos pedaços de cano em cima de uma placa de vidro e, utilizando massa de modelar, foi feita a vedação para que a resina não escorresse após o preenchimento. Um

desengripante em spray da marca White Lub foi aplicado ao vidro e aos canos para facilitar a retirada das amostras após a cura da resina.

A resina escolhida foi de poliéster da marca Carplast. Sua preparação foi feita em uma garrafa de plástico cortada ao meio. Após a adição da quantidade desejada do material, acrescentou-se 1% em massa de catalisador e, com um bastão de vidro, a mistura foi homogeneizada. A resina foi então despejada dentro dos canos de PVC, tomando o devido cuidado para que não houvesse movimentação das amostras e também para que ocorresse o preenchimento completo dentro dos suportes utilizados para manter as amostras estáveis. A Figura 6 ilustra as amostras durante o processo de cura da resina. O material azul e vermelho na base dos canos é a massa de modelar.

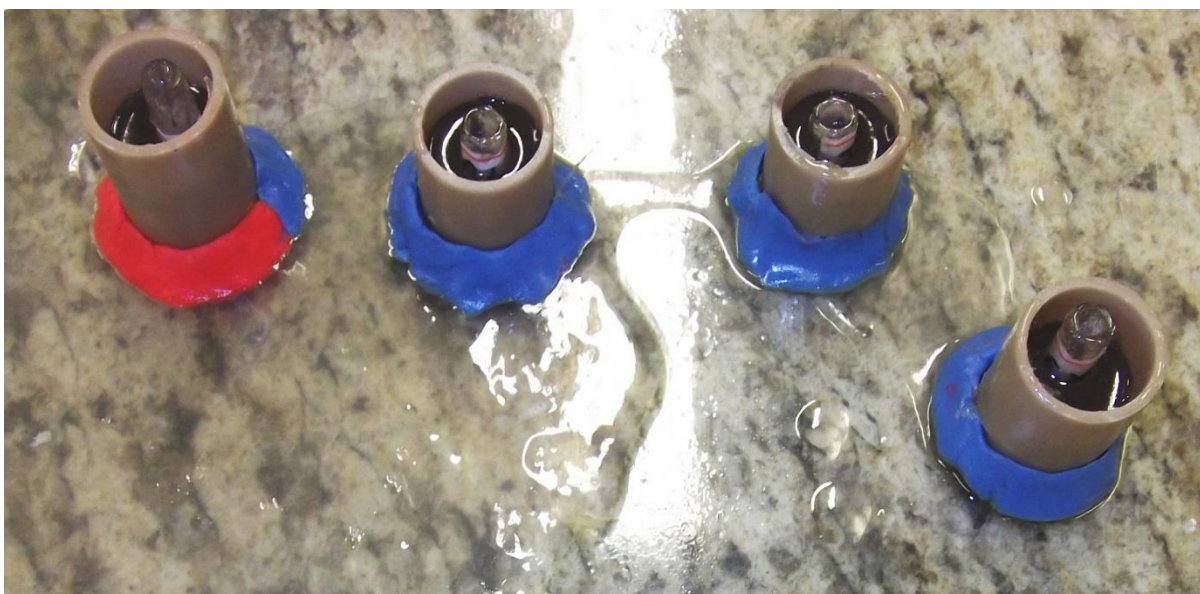


Figura 6 - Amostras durante o processo de cura da resina.  
Fonte: Autoria própria.

Após a finalização da cura da resina, as amostras foram removidas de dentro dos canos e as bolhas superficiais foram preenchidas com cola.

### 3.1.2 Lixamento e Polimento das Amostras

Com uma lixa de granulometria 80 foi feito o desbaste inicial das amostras, até alcançar a profundidade onde se encontrava o início da amostra posicionada horizontalmente. Em seguida uma lixa de granulometria 220 foi utilizada para se chegar até a metade desta amostra. O acabamento foi feito com lixas de granulometria

1200 e 1500. O polimento foi feito em uma politriz da marca Fortel modelo PLF utilizando alumina em suspensão número 4, com partículas de 1  $\mu\text{m}$ ; e número 3, com partículas de 0,3  $\mu\text{m}$ ; ambas da marca Skill-tec. O resultado final pode ser visto na Figura 7.

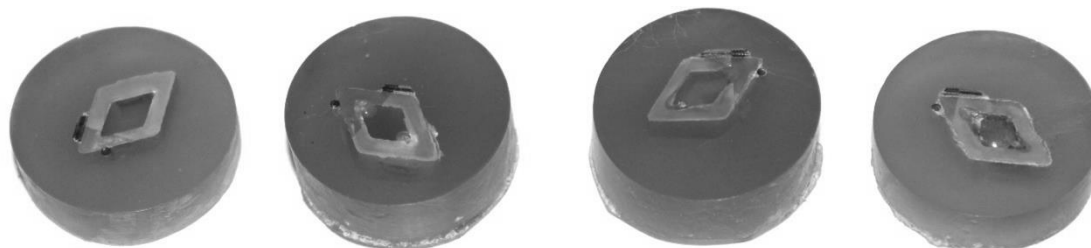


Figura 7 - Amostras embutidas após o lixamento e o polimento.  
Fonte: Autoria própria.

### 3.2 IMERSÃO DAS AMOSTRAS

Para que fossem recriadas as condições de uso dos encordoamentos foi preparado um aparato para tracionar e imergir as amostras em suor artificial, o qual será descrito nos tópicos seguintes.

#### 3.2.1 Preparação da Solução de Suor Artificial

A preparação da solução de suor artificial tomou como base a composição de 0,3% de cloreto de sódio, 0,1% de sulfato de sódio, 0,2% de uréia e 0,2% de ácido láctico com pH de 4,5. Para ajuste do pH foi utilizado hidróxido de amônio. A Tabela 3 mostra os dados dos reagentes utilizados.

Tabela 3 - Informações sobre os reagentes utilizados para produção do suor artificial.

Reagente	Marca	Teor / Concentração
Cloreto de Sódio P.A.	NEON	>99,0%
Sulfato de Sódio Anidro	Fmaia	>99,0%
Uréia P.A.	Alphatec	>99,0%
Ácido Láctico P.A.	Cinética	84,5 – 85,5%
Hidróxido de Amônio P.A.ACS	BIOTEC	Não informado

Fonte: Autoria própria.



Um béquer com 992 mL de água destilada foi colocado em um agitador magnético da marca SOLAB modelo SL-91. Utilizando-se uma barra magnética o líquido foi mantido em agitação constante para garantir a mistura de todos componentes ao serem adicionados. Em uma balança analítica da marca Bioscale modelo 2204, foram pesados 3,0008 gramas de cloreto de sódio, 1,0007 gramas de sulfato de sódio, 2,0009 gramas de uréia e 2,3754 gramas de ácido láctico. Os reagentes foram então adicionados um por um ao béquer nesta ordem.

Após a homogeneização da solução, um pHmetro foi utilizado para verificação do pH, resultando em uma leitura de 2,55. Com uma pipeta de 1 mL adicionou-se hidróxido de sódio em doses de 0,1 mL até atingir um pH próximo de 4,5. Após a adição de 2,2 mL do reagente, o pH alcançou o valor de 4,61. Também foram usadas tiras de medição de pH da marca Qualividros para confirmação da leitura. A Figura 8 mostra o aparato utilizado para a produção da solução e medição do pH.



Figura 8 - Aparato organizado para produção da solução de suor artificial e medição do pH. Na imagem é possível observar o agitador magnético a esquerda e o pHmetro a direita, com sua ponteira de leitura posicionada dentro do béquer no qual se encontra a amostra.

Fonte: Autoria própria.

O produto final obtido foi armazenado em um recipiente de vidro e mantido protegido de luz direta e calor.

### 3.2.2 Construção do Aparato

O objetivo do projeto foi de simular as condições de uso, portanto a idealização do aparato partiu dos conceitos básicos utilizados na estrutura de uma guitarra elétrica. O modelo construído foi constituído por: um componente de fixação em cada extremidade da corda, sendo um destes ajustável para que fosse possível controlar a tensão exercida; dois apoios afastados por uma distância conhecida, entre os quais a corda tem liberdade para vibrar e produzir o som; um espaço para instalação e manipulação dos recipientes com o suor artificial; e uma estrutura rígida o suficiente para aguentar a tensão das quatro cordas sem ceder.

A estrutura foi montada com madeira, o mesmo material utilizado para construção da grande maioria das guitarras elétricas. Essa escolha foi feita devido a sua disponibilidade, resistência e facilidade de processamento.

Como pode ser observado na Figura 9, as cordas de guitarra possuem pequenas argolas de metal em uma de suas extremidades, para que esta possa ser fixada na ponte da guitarra. Isso possibilitou que a corda fosse facilmente fixada na estrutura do aparato a partir de um prego com a espessura adequada.



Figura 9 - Argolas nas extremidades de cordas.  
Fonte: Guiter Adventures, [s.d.]

Como uma das extremidades da corda estava fixa, a outra deveria ser planejada de forma que o ajuste da tensão fosse possível. Para isso, foi escolhida a utilização de tarraxas, as mesmas utilizadas para essa finalidade na guitarra elétrica.



As tarraxas utilizadas foram retiradas de uma guitarra modelo Stratocaster®. Para a instalação destas no aparato, foram feitos quatro furos com uma furadeira de bancada da marca Toolmix modelo FB 313, pelos quais foi passada a tarraxa e então foi feita a fixação com uma porca sextavada. A Figura 10 mostra as quatro tarraxas já instaladas.



Figura 10 - Tarraxas instaladas e fixadas no aparato.  
Fonte: Autoria própria.

Foram instalados três pontos de apoio com distância conhecida entre si para as cordas. Com isso foram criadas duas seções no aparato, sendo que uma seria dedicada para a instalação dos recipientes com a solução de suor artificial, e a segunda é onde a corda possui liberdade para vibrar. Devido a limitação do comprimento das cordas, não foi possível utilizar o comprimento de uma escala de guitarra comum (25 1/2 polegadas) na seção de vibração, portanto os pontos de apoio foram posicionados a uma distância de 12 3/4 polegadas entre si, o equivalente à metade de uma escala. Para se calcular a frequência (FR) necessária para esse comprimento de escala de forma que se mantenha a mesma tensão na corda, pode-se rearranjar a equação (1) de forma que:

$$FR = ( ( ( F * 386,4 ) / UM )^{1/2} ) / ( 2 * CE ) \quad (2)$$

Como a força (F) e a massa unitária (UM) são constantes, pode-se substituir toda a parte constante por C, obtendo-se:

$$C / CE = FR \quad (3)$$

Tem-se então uma relação inversamente proporcional entre o comprimento da escala (CE) e a frequência de vibração da corda (FR).

Os recipientes para imersão foram projetados com o objetivo de: a) manter uma região de comprimento conhecido da corda submersa; b) impedir vazamento da solução de suor artificial; c) impedir a evaporação da solução; e d) resistir aos impactos decorrentes da ruptura de alguma das cordas sem prejudicar sua integridade. Após diversos testes e aperfeiçoamentos, o esquema escolhido para o projeto final foi o mostrado na Figura 11.

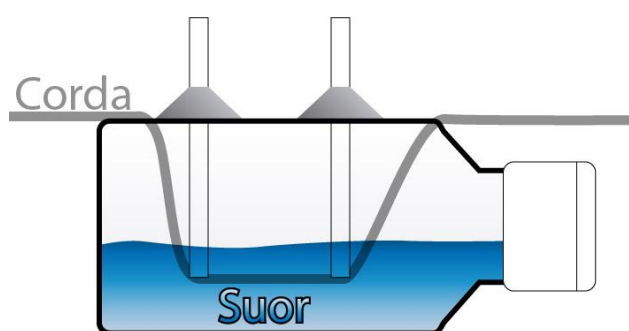


Figura 11 - Esquema do recipiente para imersão da corda em solução de suor artificial.  
Fonte: Autoria própria.

Esse recipiente foi confeccionado a partir de uma embalagem plástica pequena, que foi lavada com água destilada antes do uso. A corda entra e sai por orifícios na parte superior e é forçada para baixo por duas placas de plástico. Essas placas são fixadas ao recipiente por uma massa adesiva de epóxi da marca Loctite, que também foi usada para vedar a entrada e a saída da corda. Na parte a direita do recipiente na Figura 11 está a tampa, por onde foi feita a manipulação da corda no interior durante a instalação, e também a remoção da solução ao final do experimento.

### 3.2.3 Início da Imersão

#### 3.2.3.1 Aparato

A corda D4 de cada encordoamento foi instalada no aparato. Sua frequência de vibração em uma escala com comprimento de 25 1/2 polegadas corresponde a

587.33 Hz, que equivale a nota Ré<sub>5</sub> (SUITS, 1998). A partir da equação (3) pode-se deduzir que, ao dividir o comprimento da escala por dois, a frequência de vibração deve ser dobrada para que se mantenha o resto constante. Portanto, após a instalação as quatro cordas posicionadas no aparato foram reguladas para 1.174,66 Hz, que equivale a nota Ré<sub>6</sub> (SUITS, 1998). Para isso foi utilizado um captador de uma guitarra modelo Stratocaster<sup>®</sup> ligado a um console de efeitos de guitarra da marca Zoom modelo G7.1UT através do sistema elétrico original da guitarra. Para garantir a reprodutibilidade e homogeneidade do ajuste, foi utilizada uma palheta da marca Dunlop de 0,88 mm de espessura para gerar a vibração das cordas, e esta era lida pelo console que mostrava a frequência de vibração em sua tela, permitindo o ajuste pelas tarraxas em tempo real até atingir a configuração desejada. A Figura 12 mostra como foi feito o arranjo para isso.



Figura 12 - Teste da configuração utilizada para o ajuste da frequência de vibração das cordas.  
Fonte: Autoria própria.

Após a montagem, os quatro recipientes foram preenchidos com a solução de suor artificial de forma que todas as cordas tivessem porções semelhantes submersas. Os orifícios foram então vedados com massa adesiva de epóxi para garantir que não houvesse evaporação do líquido. A tensão das cordas foi verificada diariamente e ajustada caso necessário. A Figura 13 mostra a seção do aparato utilizada para a instalação dos recipientes para a imersão e a Figura 14 mostra a seção

utilizada para ajuste da tensão das cordas. As amostras ficaram submersas por 10 dias e então as cordas foram retiradas e os recipientes de plástico foram vedados com massa adesiva de epóxi para preservar a solução até a análise.

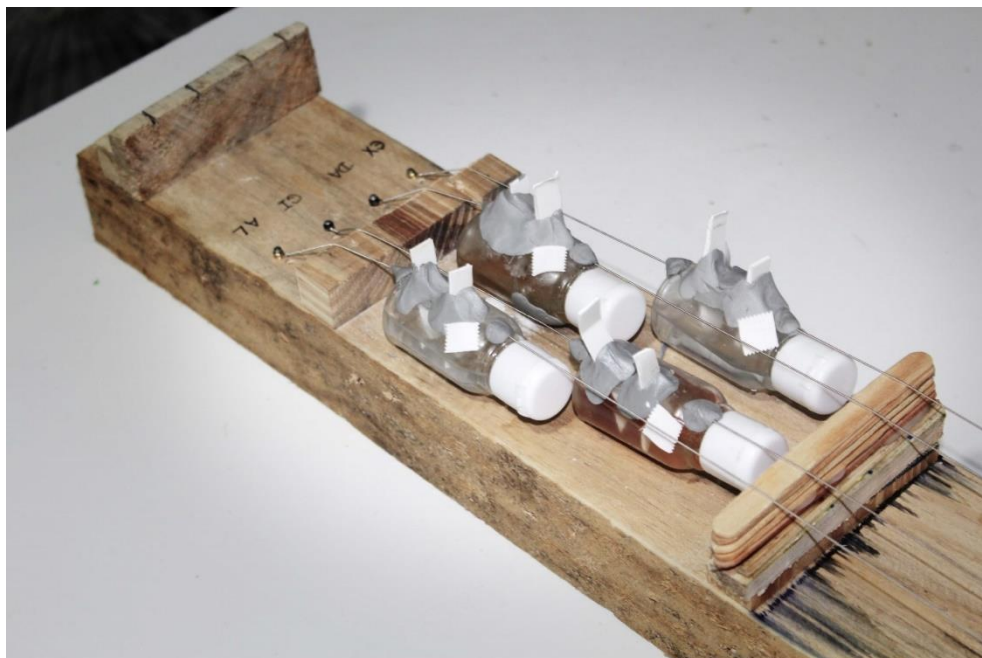


Figura 13 - Seção do aparato utilizada para o posicionamento dos recipientes com solução de suor artificial.  
Fonte: Autoria própria.

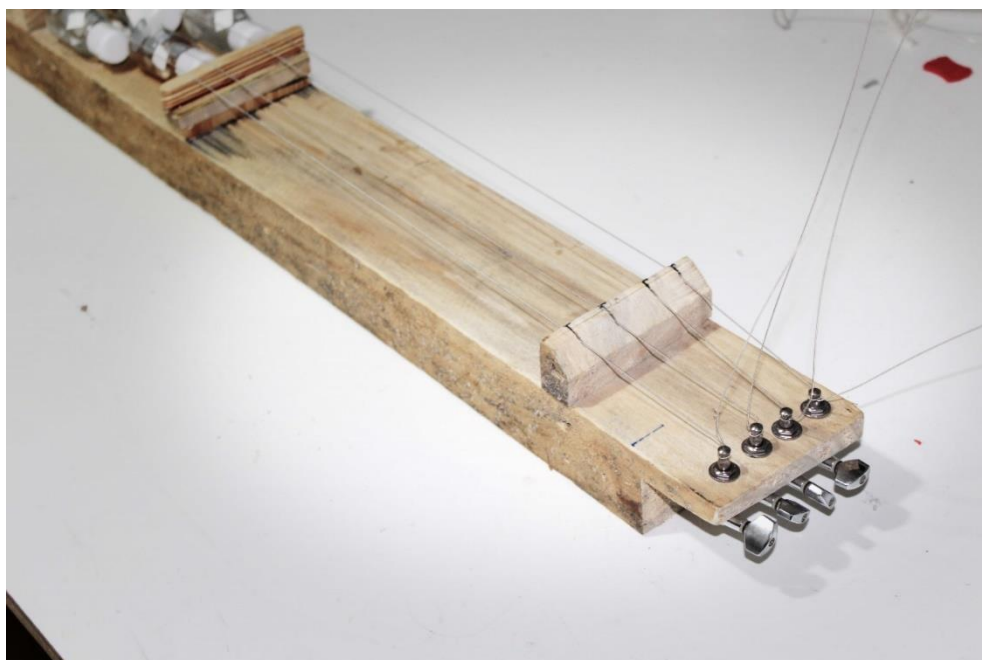


Figura 14 - Seção do aparato utilizada para verificação e ajuste da tensão das cordas.  
Fonte: Autoria própria.

### **3.2.3.2 Tubos de Ensaio**

Com o objetivo de se obter um patamar para comparação com o experimento do aparato, foram cortados pedaços de 3 cm de cada corda e colocado em tubos de ensaio contendo 8 mL da solução de suor por 10 dias. As amostras foram então retiradas dos tubos e estes foram mantidos ao abrigo do calor e luz até a data da análise.

## **3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS**

### **3.3.1 Microscopia Óptica**

As amostras embutidas foram levadas para um microscópio da marca Zeiss modelo AX10 para que fossem feitas imagens de sua superfície contendo as seções transversal e longitudinal das cordas. O equipamento possui lentes com 5, 10, 20, 50 e 100 vezes de ampliação, o que permitiu uma ampla análise das amostras.

#### **3.3.1.1 Ataque Químico da Amostra com Nital**

O núcleo das cordas é feito de aço, porém sua espiral é niquelada, ou seja, possui uma fina camada de níquel em sua superfície para melhorar sua proteção a corrosão (FRIIS et al., 2012). Para que fosse possível observar essa camada superficial com mais precisão foi colocada uma gota de nital 2% na superfície de cada amostra por cinco minutos. Uma fita adesiva foi utilizada para isolar metade da amostra do contato com o reagente, permitindo que fosse feita uma comparação entre a região atacada e a região isolada. Após o tempo estipulado, as amostras foram lavadas com água destilada e acetona para a remoção de todo o nital e então novas imagens foram feitas no microscópio óptico.

O nital é um reagente utilizado para ataques químicos em aço e ferro não ligado e de baixa liga, metal branco, ligas de magnésio e aços de alta liga com estrutura martensítica (ROHDE, 2010). Portanto, ao entrar em contato com a superfície das amostras, ocorre a reação apenas com o núcleo e a parte interna da espiral da corda, evidenciando a camada de níquel que não reage com o reagente.

Após o ataque, novas imagens foram feitas na região da espiral das cordas.

### 3.3.2 Espectrometria de Absorção Atômica

O método escolhido para quantificar a liberação de níquel na solução de suor artificial foi a espectrometria de absorção atômica devido a sua precisão e eficiência para determinação de elementos únicos em uma amostra.

As amostras da solução de suor artificial foram filtradas com uma membrana faixa preta da marca Unifil modelo C41 para retenção de partículas maiores que 12  $\mu\text{m}$  que podem obstruir o capilar do espectrômetro. Para o armazenamento das amostras foram utilizados tubos de ponta cônica tipo *falcon* de 15 mL. Três amostras da solução de suor artificial original foram também preparadas da mesma forma para verificar se não havia traços de níquel nos reagentes utilizados. Adicionou-se 1% em massa de ácido nítrico bidestilado às amostras para garantir que o níquel não ficasse aderido às paredes durante a análise.

O equipamento utilizado foi um espectrômetro de absorção atômica da marca Thermo Scientific modelo iCE 3000 series com atomização por chama e lâmpada de cátodo oco para leitura de níquel. O aparelho se encontra no Laboratório Multiusuário da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Apucarana. Para a calibração utilizou-se um padrão de níquel de 1000 ppm.

Em um espectrômetro de absorção atômica a atenuação da radiação emitida por uma fonte que ocorre devido a presença de um determinado elemento é medida pelo detector que converte essa variação em um sinal de absorbância. Porém, para transformar esse valor em termos que se aplicam a esse trabalho é necessário que seja feita uma curva de calibração para o elemento, o que permite que a absorbância seja convertida em concentração.

Para se obter a curva de calibração foi utilizado um padrão de níquel de 1000 ppm, a partir do qual foram preparadas quatro soluções de concentração conhecida (1, 3, 5 e 8 ppm). Foi feita a leitura dessas amostras no equipamento, o que retornou valores de absorbância referente a essas concentrações. Como a relação entre a absorbância e a concentração se dá de forma linear, foi feita a linearização desses pontos, como se verifica no Gráfico 3. Dessa forma, qualquer valor de absorbância lido no equipamento pode ser aplicado na reta linearizada para que se descubra a concentração correspondente.



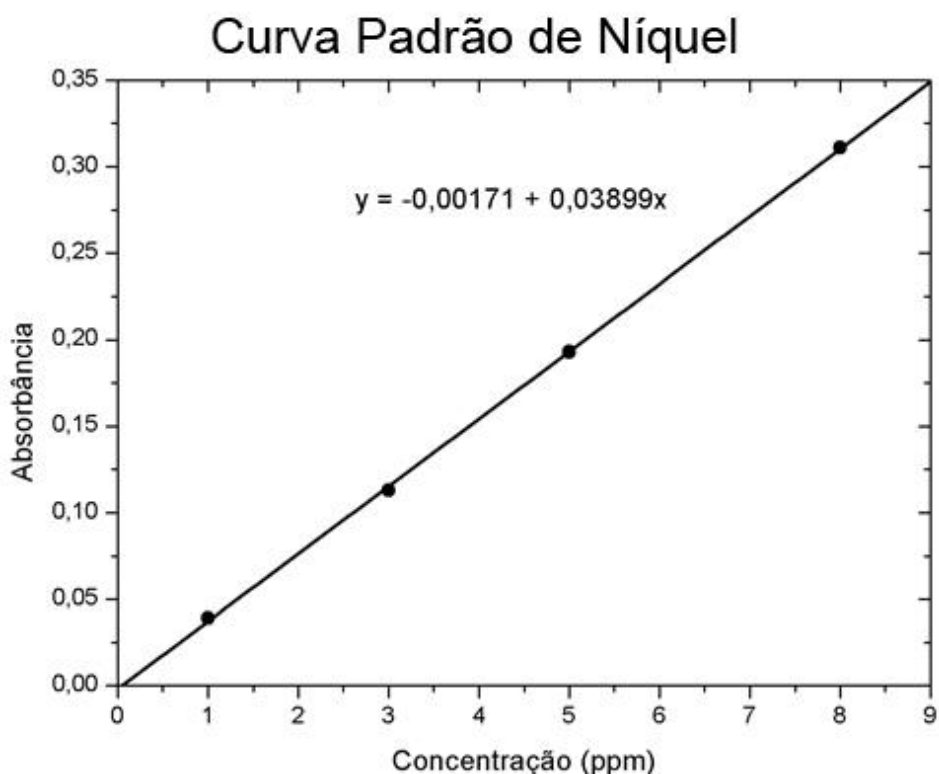


Gráfico 3 - Linearização dos pontos de calibração do espectrômetro de absorção atômica.

Fonte: Autoria própria.

### 3.3.3 Estereoscopia

Para a caracterização da superfície das amostras foi utilizado um estereoscópio da marca Physis com ampliação de até 4 vezes. Foram analisadas as amostras antes e depois da imersão para se observar as alterações em sua aparência. Também se utilizou a luz transmitida do estereoscópio para que fosse feita a identificação e análise de camadas superficiais de proteção da corda.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados dos experimentos dispostos na seção anterior.

### **4.1 MICROSCOPIA ÓPTICA**

A partir da microscopia óptica foi possível encontrar diferenças na estrutura e proteção dos encordoamentos que contribuem para o aumento ou redução da liberação de níquel das amostras. A Figura 15 mostra a seção longitudinal de todas cordas. As imagens estão todas com a mesma escala para que seja possível a comparação de dimensões, porém é importante notar que pode haver variações devido a erros de centralização e angulação da seção em relação ao eixo central de corda.



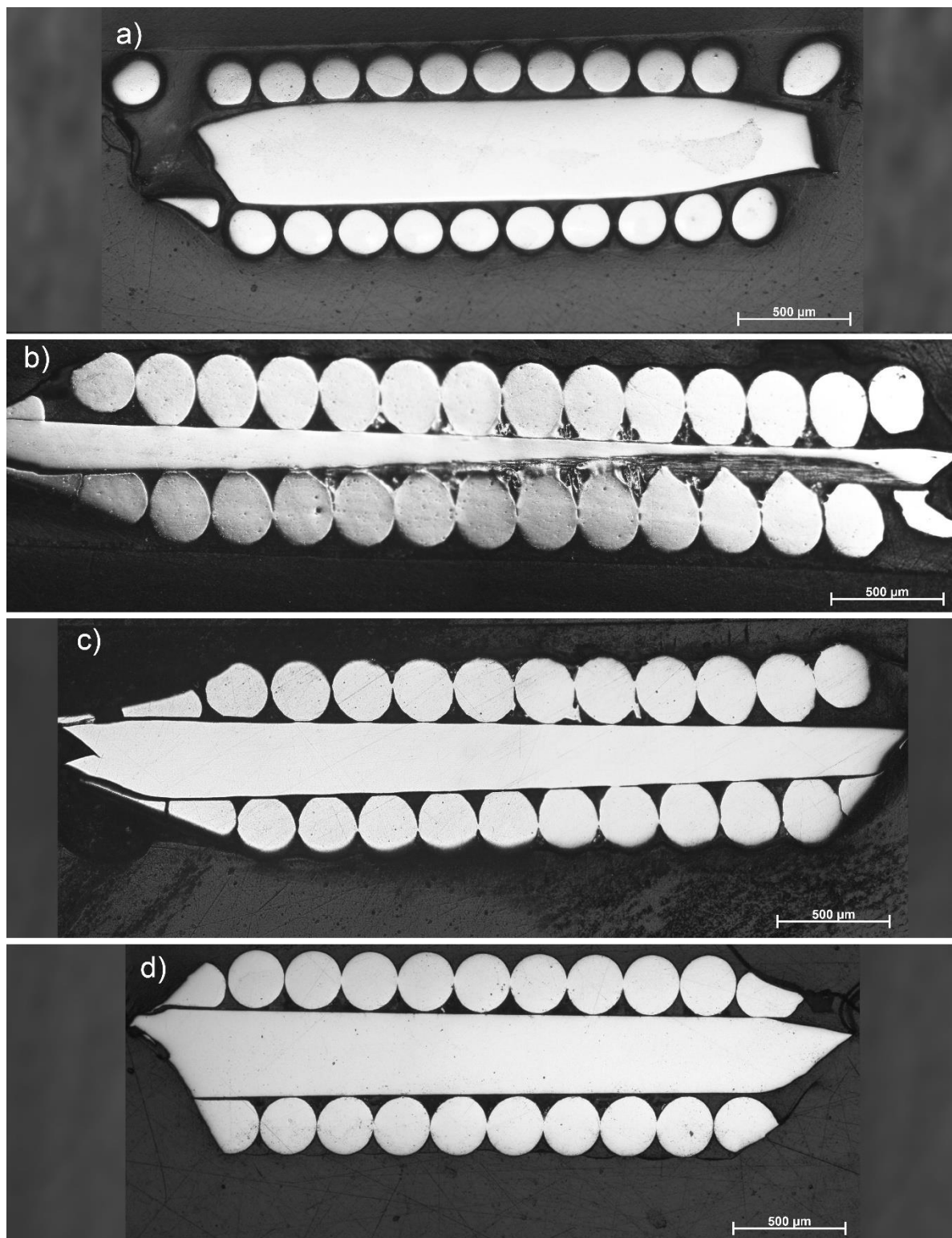


Figura 15 - Seção longitudinal da corda A5 da marca a) CN b) EUA1 c) EUA2 e d) BR.  
Fonte: Autoria própria.

Em um primeiro momento é perceptível que a corda da marca CN possui uma espiral consideravelmente mais fina do que as outras. A partir da seção transversal, mostrada na Figura 16, é possível calcular que a espessura da espiral desta corda

corresponde a cerca de 36% da espessura de seu núcleo, enquanto nas outras essa porcentagem é de aproximadamente 64%, 60% e 56% respectivamente. Considerando o fato de que o níquel está presente na superfície da espiral, isso pode ser um indicador de que a corda da marca CN pode vir a liberar uma quantidade menor do metal em relação as outras.

Também é possível notar na Figura 16 que todas cordas possuem o núcleo com seção hexagonal, o que aprimora o ancoramento entre os seus componentes.

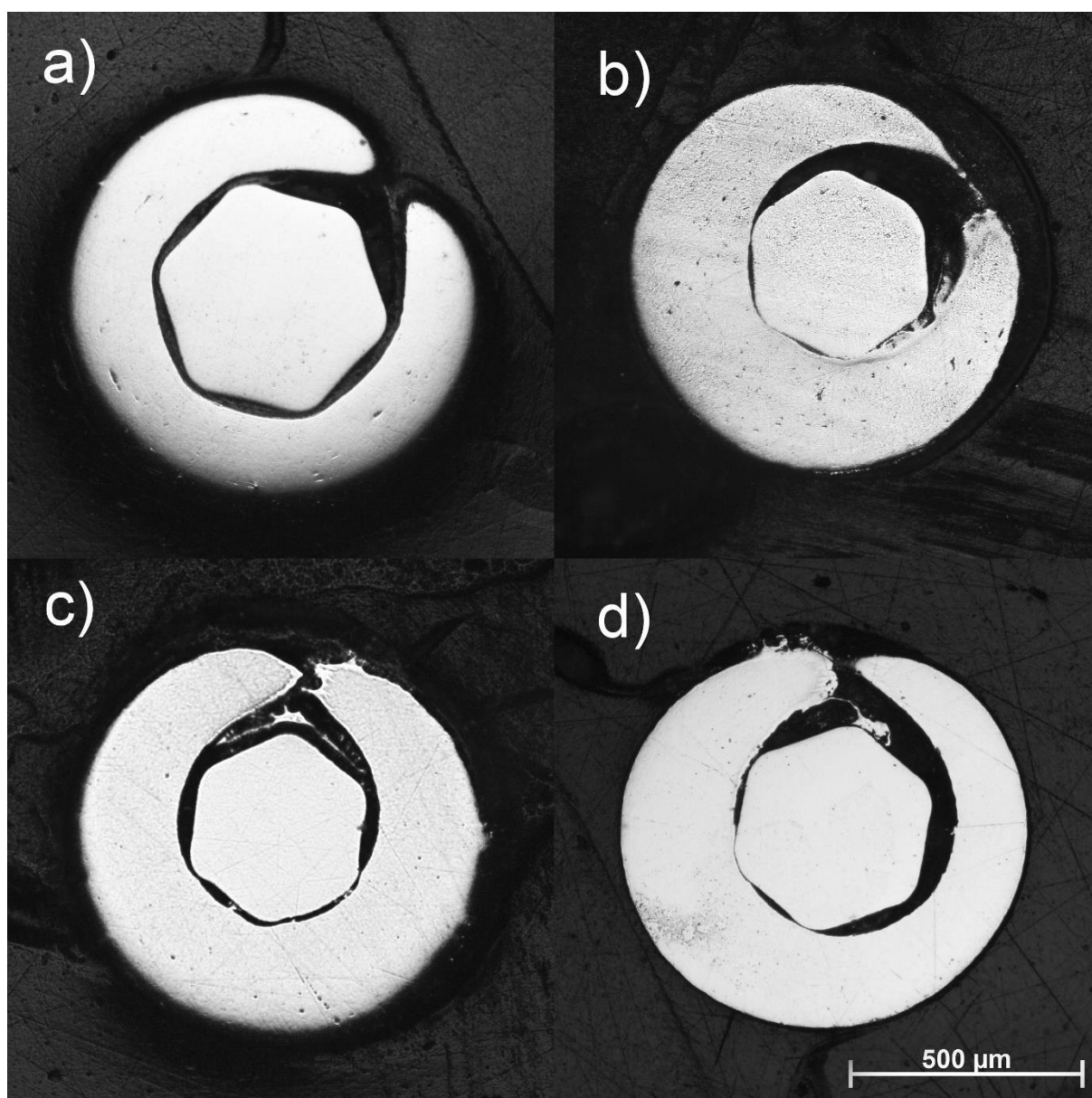


Figura 16 - Seção transversal da corda A5 da marca a) CN b) EUA1 c) EUA2 e d) BR.  
Fonte: Autoria própria.

Outro fator que pode influenciar na liberação de níquel é a presença de uma fina camada protetora na superfície da espiral, o que evita seu contato com o suor durante o uso. Esse tipo de proteção foi observado nas cordas da marca CN e EUA2.

Na corda da marca CN a proteção está presente ao redor de toda a circunferência da espiral, como pode ser visto na Figura 17. Essa camada tem cerca de 9  $\mu\text{m}$  de espessura.

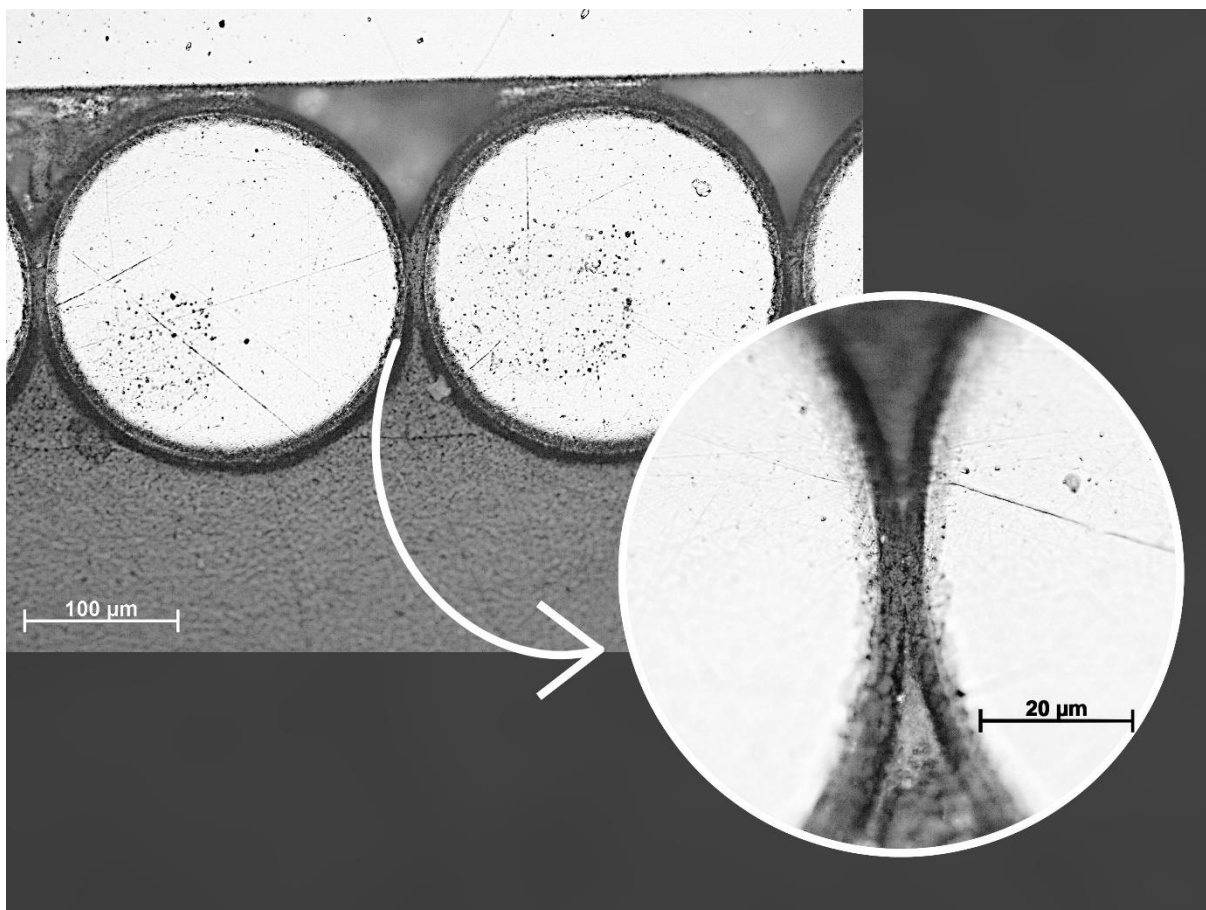


Figura 17 – Seção longitudinal da espiral da corda da marca CN com destaque para a camada de proteção em sua superfície.

Fonte: Autoria própria.

Já na marca EUA2 uma proteção com cerca de 7  $\mu\text{m}$  de espessura envolve toda a corda e se ajusta às irregularidades de sua superfície, como é possível observar na Figura 18.

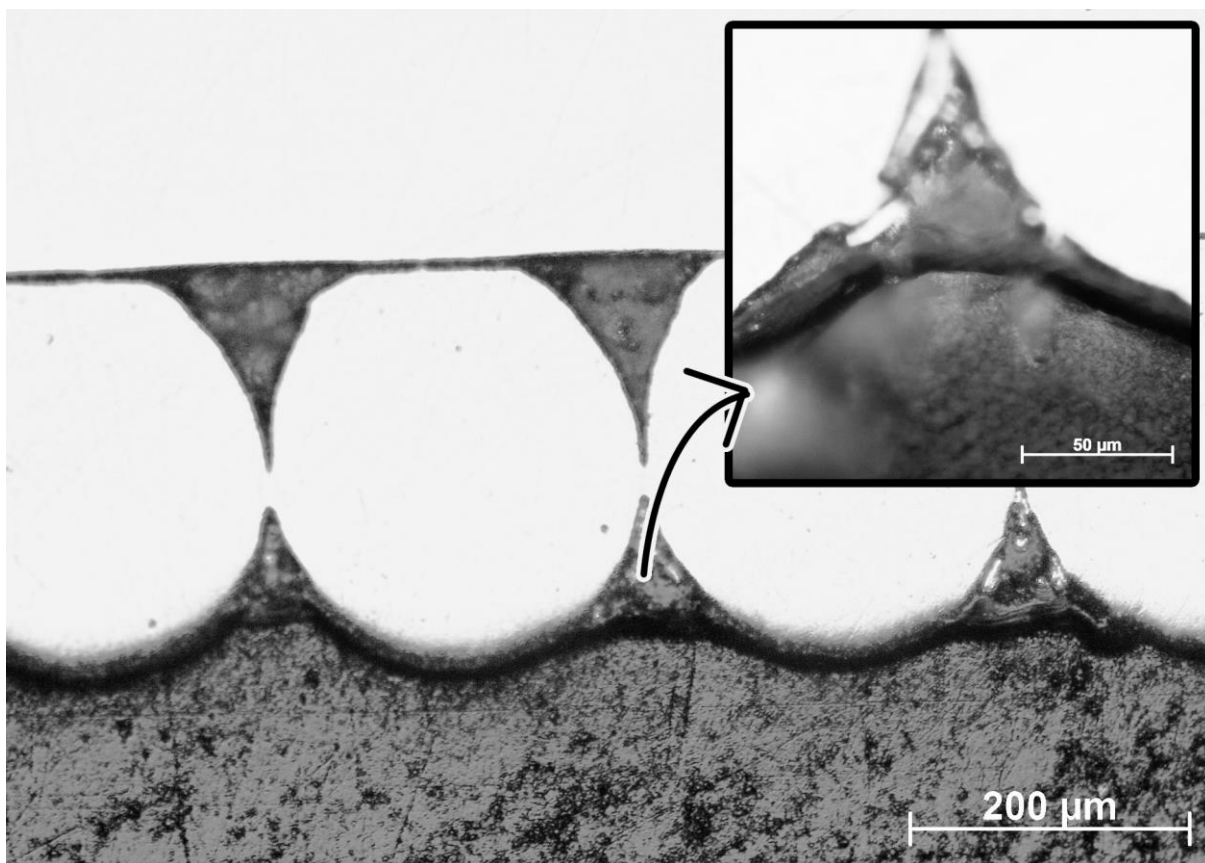


Figura 18 - Seção longitudinal da espiral da corda da marca EUA2 com destaque para a camada de proteção em sua superfície.  
Fonte: Autoria própria.

A EUA1 afirma utilizar uma proteção em sua espiral semelhante a utilizada pela CN. Porém, isso não pôde ser confirmado pelas imagens obtidas pelo microscópio óptico, como pode ser observado na Figura 19. Nesta figura observa-se as bordas da seção da espiral, porém não é possível notar nenhuma camada além do metal.

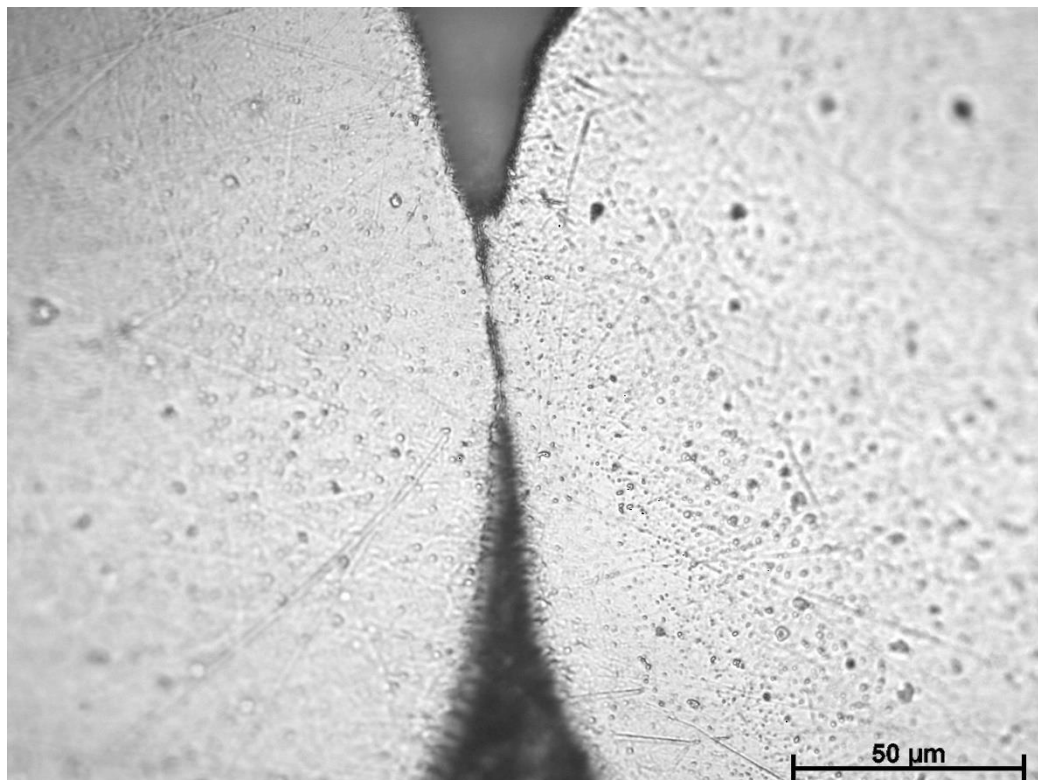


Figura 19 - Seção da espiral da corda da marca EUA1.  
Fonte: Autoria própria.

Após a obtenção das imagens mostradas anteriormente, as amostras foram submetidas ao ataque como foi explicado na seção 3.3.1.1. Após o procedimento, novas imagens foram produzidas, como mostra a Figura 20.

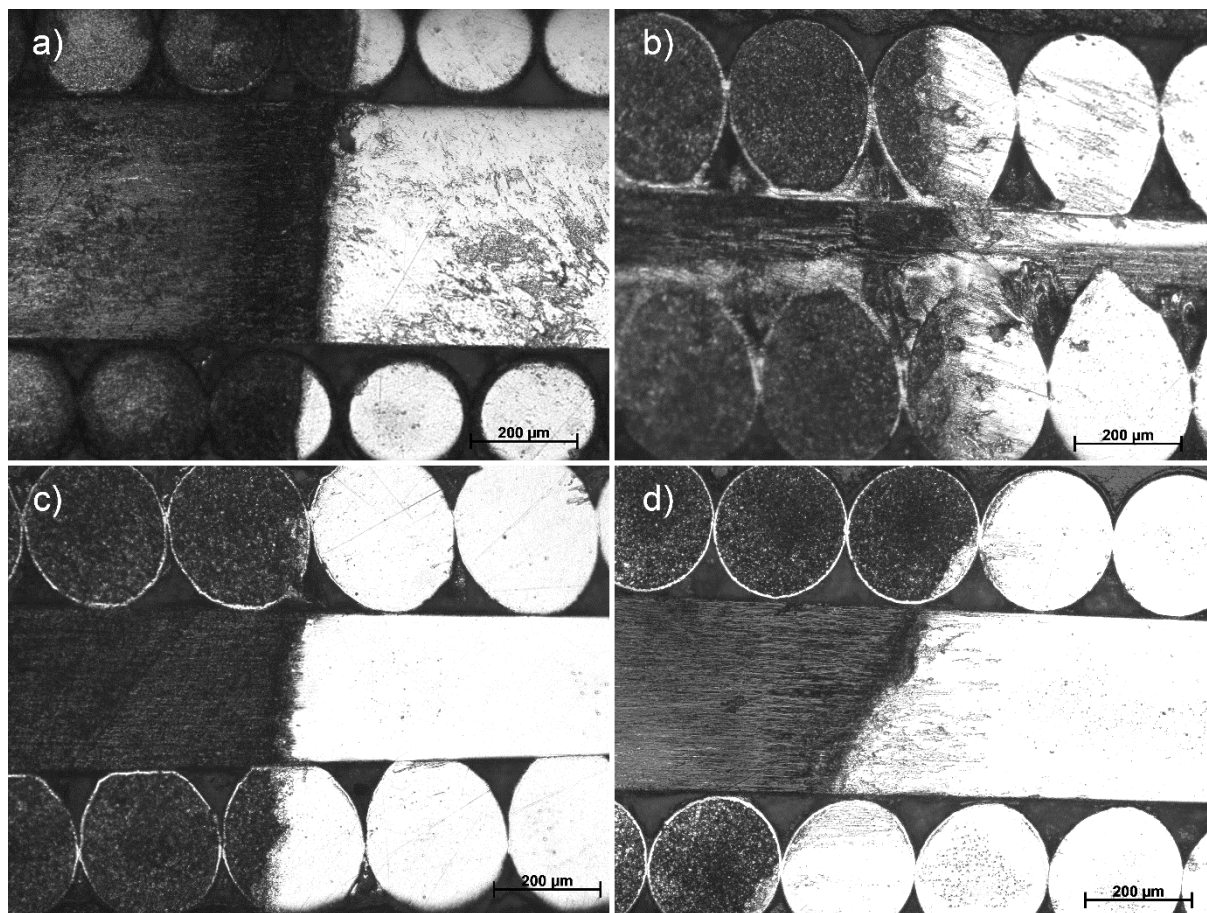


Figura 20 - Seção longitudinal da corda A5 da marca a) CN b) EUA1 c) EUA2 e d) BR.  
Fonte: Autoria própria.

A região da direita de cada imagem da Figura 20 foi isolada com fita adesiva durante o ataque e, por isso, manteve seu aspecto original. À esquerda pode-se observar que quase toda a seção adquiriu uma coloração escura, exceto regiões na bordas da espiral. Isso se deve ao fato de que essas regiões na borda são compostas por níquel depositado durante a niquelagem do componente. Embora a corda da marca CN aparente não possuir essa camada niquelada, num aumento maior é possível observar que ela está presente, como mostra a Figura 21, porém há indícios de não ter sido totalmente imune ao ataque como as das outras marcas, o que levanta dúvidas sobre a composição de sua superfície.



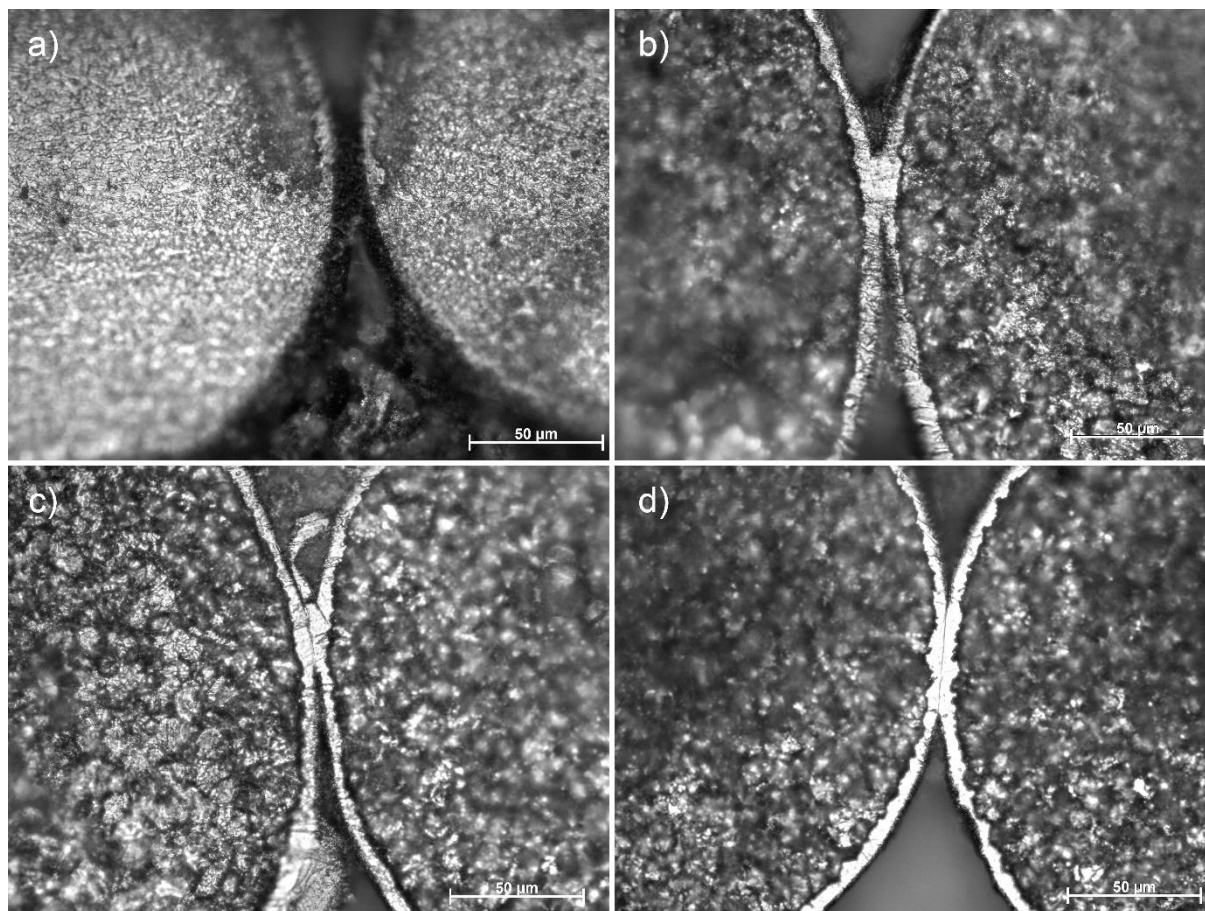


Figura 21 - Seção longitudinal da corda A5 da marca a) CN b) EUA1 c) EUA2 e d) BR.  
Fonte: Autoria própria.

## 4.2 IMERSÃO EM SOLUÇÃO DE SUOR ARTIFICIAL

Ao longo da imersão das cordas no aparato, as soluções de suor artificial nos recipientes das marcas EUA1 e BR apresentaram uma mudança na coloração em menos de 24 horas, como pode ser visto na Figura 22. Essas mesmas cordas haviam se rompido em outras tentativas de realização do experimento, portanto se deu continuidade aos testes e a solução de suor artificial da corda foi descartada.



Figura 22 – Cordas instaladas no aparato e imersas em solução de suor artificial após 24 horas.  
Fonte: Autoria própria.

A cor laranja indica a liberação de ferro na solução. É válido notar que as cordas que não apresentaram alteração na coloração são as que possuem a proteção superficial, o que evitou seu contato direto com a solução.

Durante o ensaio de imersão em suor artificial com o tracionamento no aparato, a corda da marca BR teve seu núcleo rompido devido a corrosão ocasionada pela solução. Devido a esse fator, esta corda foi removida das análises finais. A Figura 23 mostra a corda após o rompimento, ainda instalada no aparato e imersa no suor artificial. É possível perceber que mesmo após a ruptura a espiral se manteve inteira.



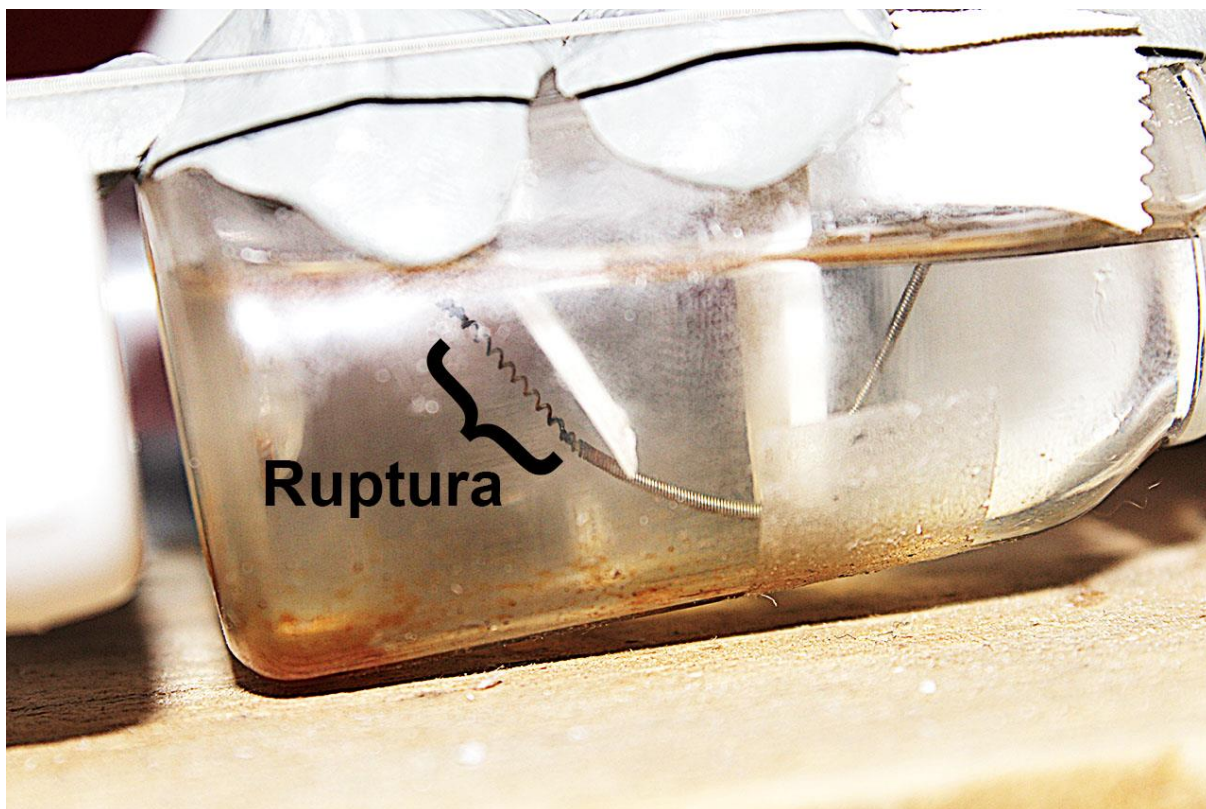


Figura 23 - Corda da marca BR após sua ruptura enquanto imersa em suor artificial e tracionada no aparato.

Fonte: Autoria própria.

Já nas amostras imersas nos tubos de ensaio o desenvolvimento da cor alaranjada se apresentou em todas as amostras, como pode ser visto na Figura 24, devido ao fato de que nestas a solução consegue penetrar e atingir o metal pelas extremidades da amostra.



Figura 24 - Amostras imergidas em solução de suor artificial em tubos de ensaio.

Fonte: Autoria própria.

### 4.3 ESTEREOSCOPIA

#### 4.3.1 Cordas Antes da Imersão em Solução de Suor Artificial

Antes dos ensaios de imersão das amostras em suor artificial, as cordas foram fotografadas no estereoscópio para se obter imagens de referência para posterior comparação. A Figura 25 e a Figura 26 mostram as imagens obtidas utilizando luz refletida e luz transmitida, respectivamente. Nestas imagens fica novamente visível a película protetora que envolve a corda da marca EUA2, principalmente nas imagens por luz transmitida.

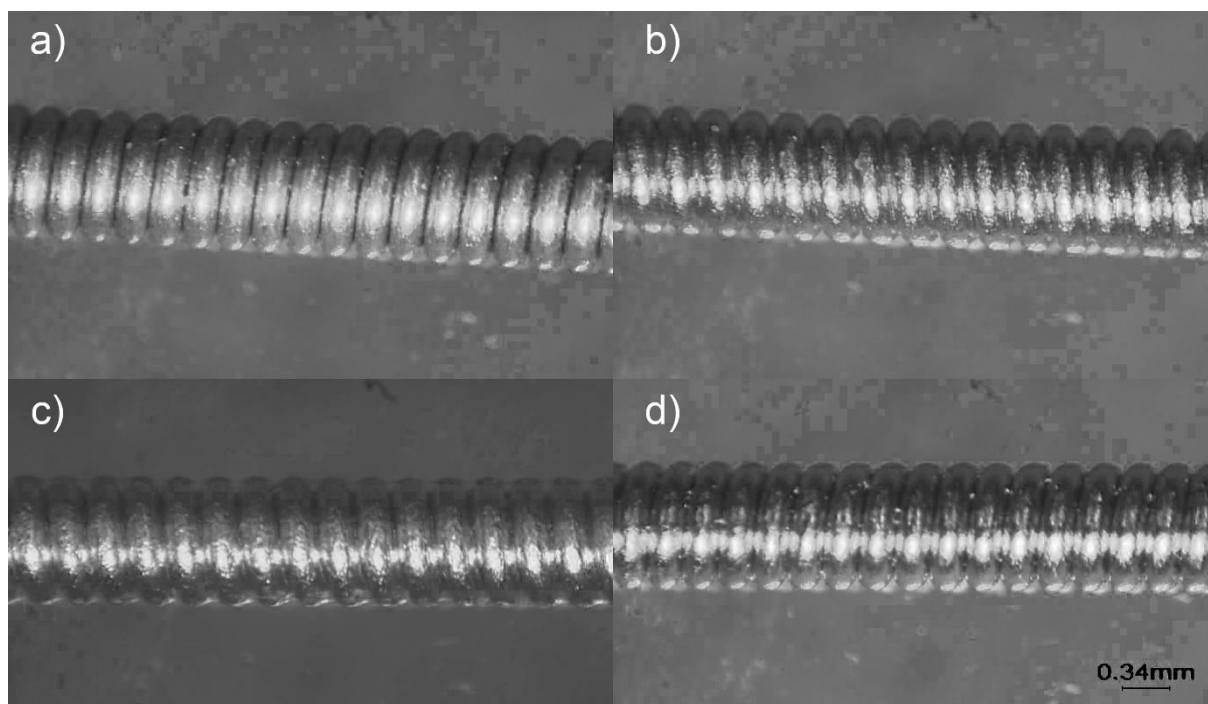


Figura 25 - Imagem obtida no estereoscópio com luz refletida da corda A5 da marca a) CN b) EUA1 c) EUA2 e d) BR.

Fonte: Autoria própria.

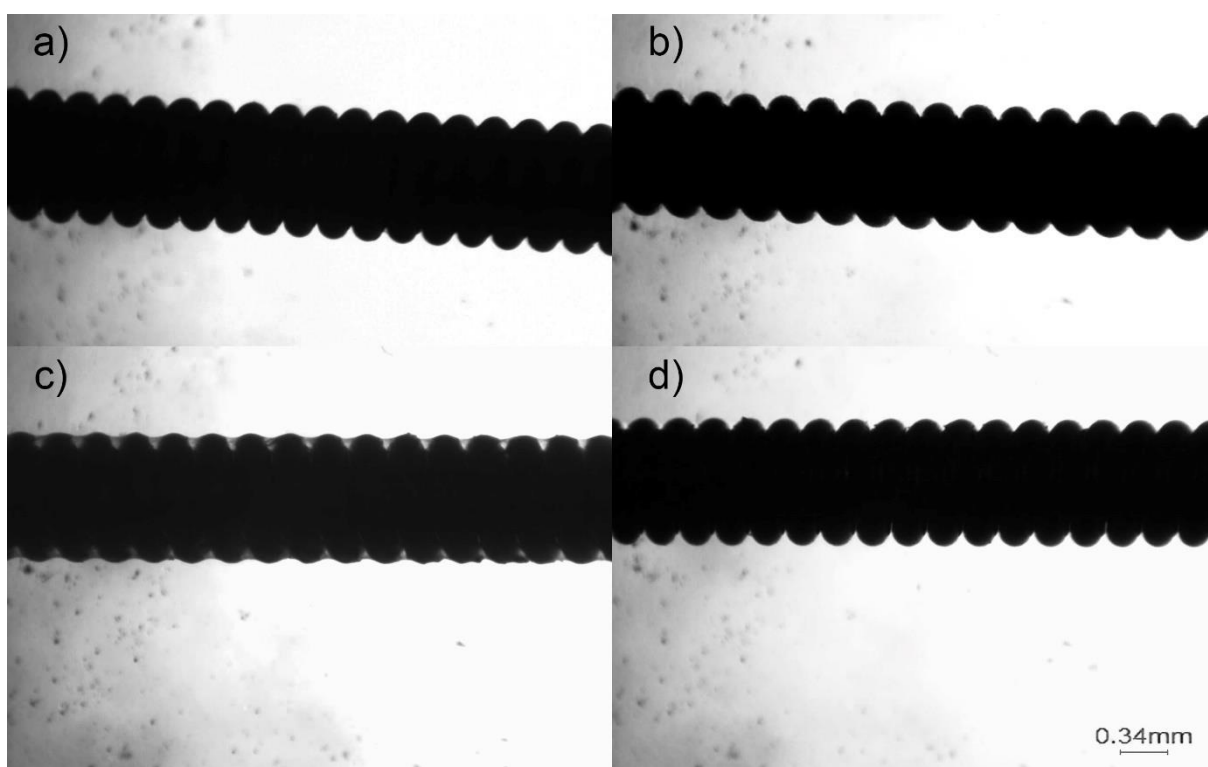


Figura 26 - Imagem obtida no estereoscópio com luz transmitida da corda A5 da marca a) CN b) EUA1 c) EUA2 e d) BR.

Fonte: Autoria própria.



### 4.3.2 Cordas Após a Imersão em Solução de Suor Artificial

Na Figura 27 é possível observar a corda D4 da marca CN após a imersão em um tubo de ensaio com a solução de suor sem tracionamento. Parte da película protetora começou a descascar, o que permitiu o contato direto do metal com a solução gerando as manchas de coloração alaranjada. Isso não ocorreu na amostra que foi submetida a imersão tracionada no aparato, como pode ser visto na Figura 28. Isso levanta dúvidas sobre a origem desses danos. Podem ter sido ocasionados durante o transporte, já que não havia uma proteção entre as cordas na embalagem, ou podem ter sido gerados durante a manipulação. Porém, se mesmo com a manipulação cautelosa e livre de atritos a proteção se desgastou, o usuário comum provavelmente também causaria danos a essa camada durante a instalação da corda, o que coloca em risco a sua verdadeira eficiência.

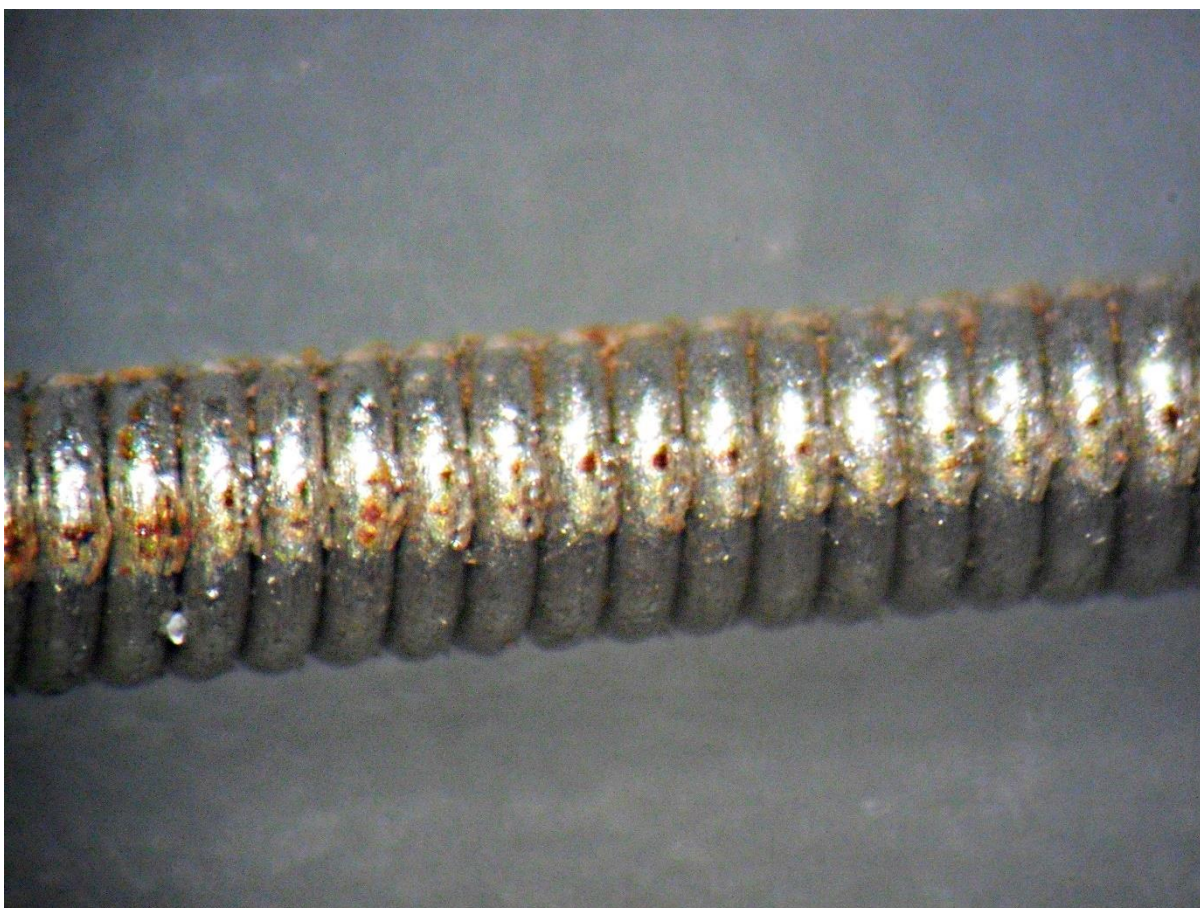


Figura 27 - Imagem obtida no estereoscópio com luz refletida da corda D4 da marca CN após a imersão em tubos de ensaio com a solução de suor artificial sem tracionamento.  
Fonte: Autoria própria.

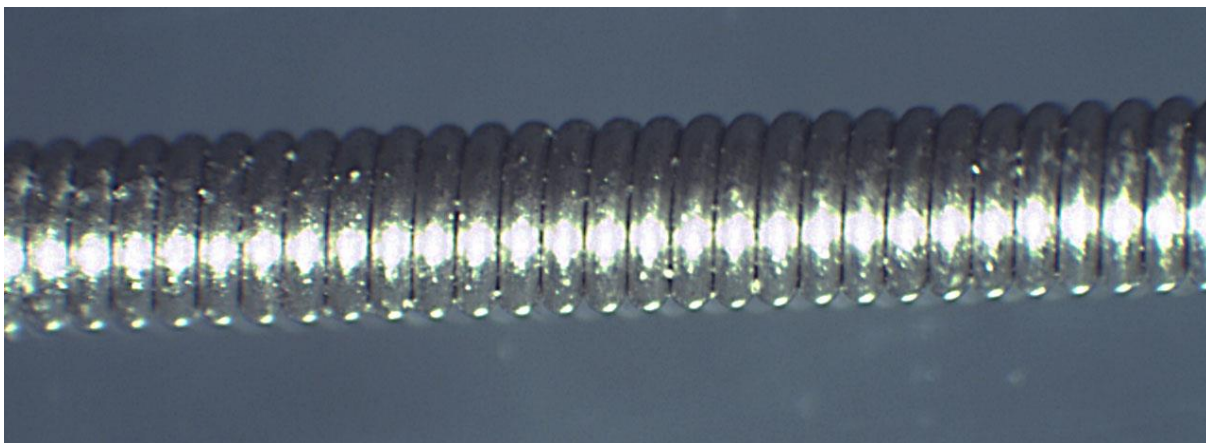


Figura 28 - Imagem obtida no estereoscópio com luz refletida da corda D4 da marca CN após a imersão tracionada no aparato.  
Fonte: Autoria própria.

Já a proteção superficial da corda da marca EUA2 não sofreu danos, como mostra a Figura 29. Mesmo em regiões onde a corda esteve sujeita a flexão.

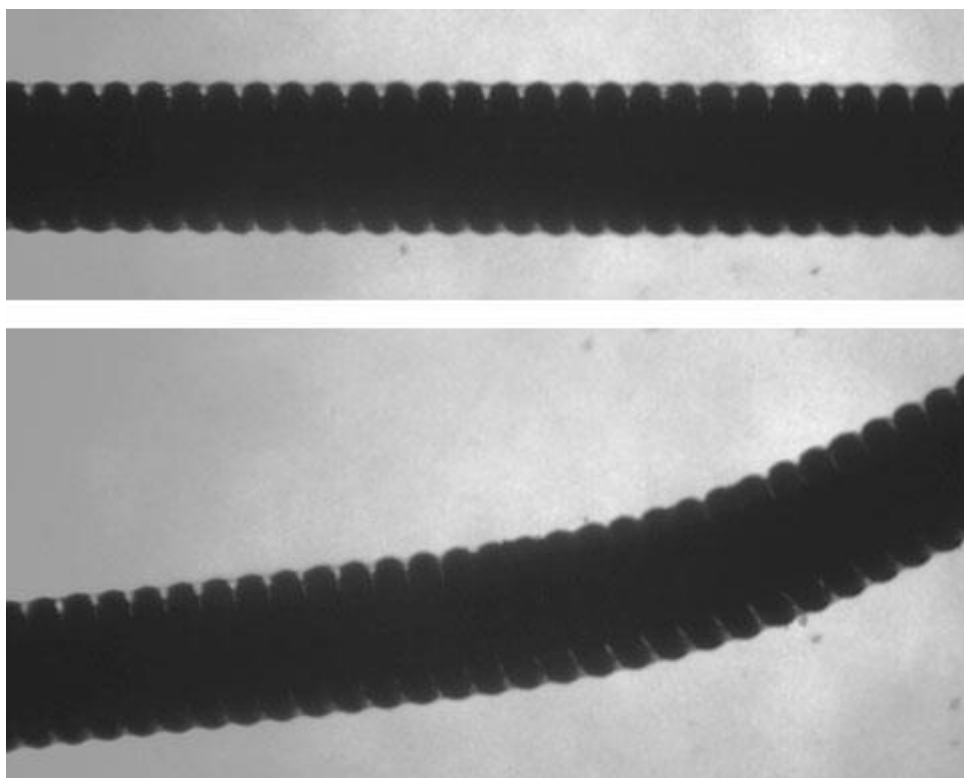


Figura 29 - Imagens obtidas no estereoscópio com luz transmitida da corda D4 da marca EUA2 após a imersão tracionada no aparato.  
Fonte: Autoria própria.

A Figura 30 mostra a aparência final das cordas submetidas a imersão tracionadas no aparato.

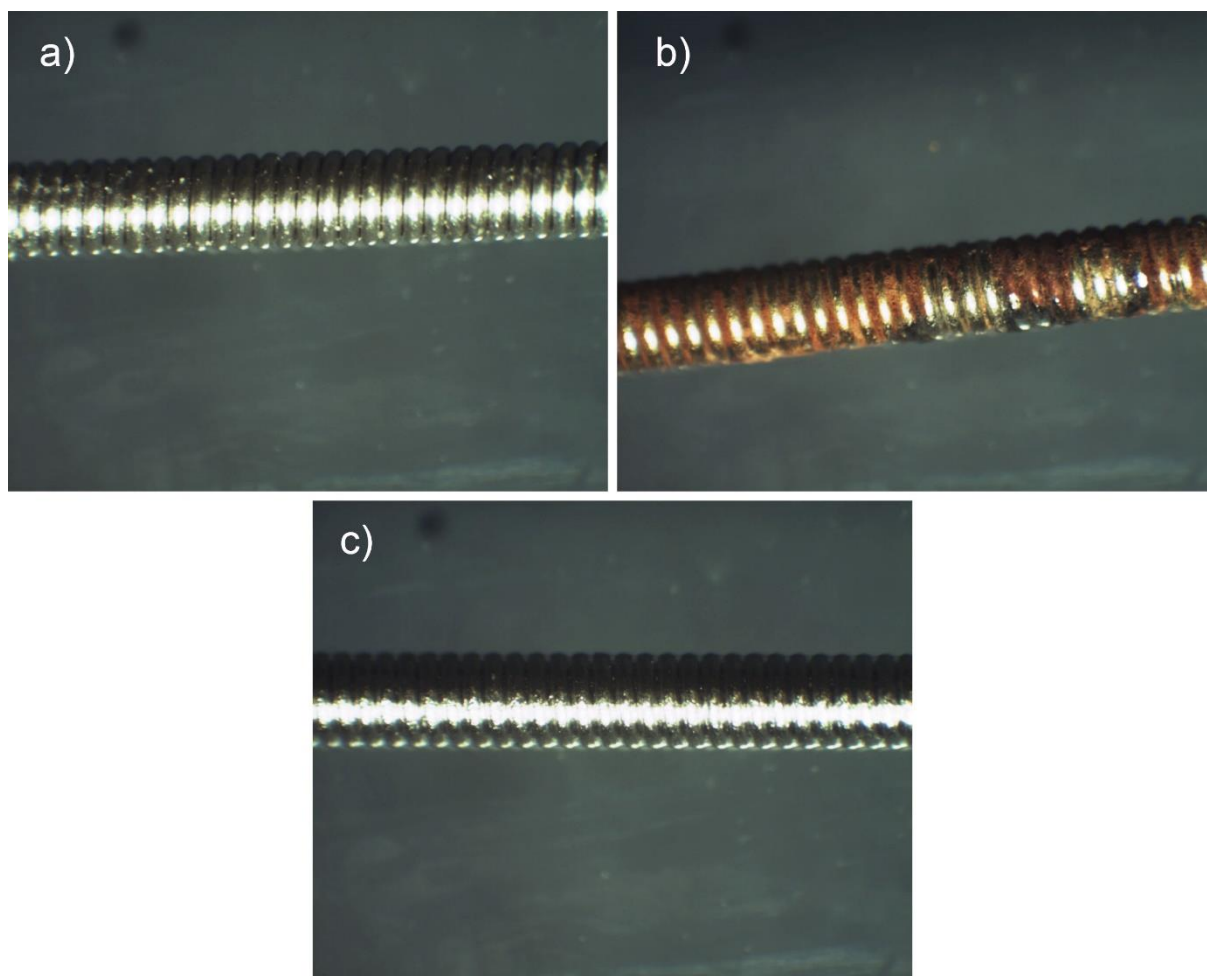


Figura 30 - Imagem obtida no estereoscópio com luz transmitida da corda D4 da marca a) CN, b) EUA1 e c) EUA2 após a imersão tracionada no aparato.  
Fonte: Autoria própria.

Fica evidente que a corda da marca EUA1 apresenta sinais muito mais acentuados do que as outras. A coloração alaranjada em sua superfície é proveniente da liberação de ferro durante a corrosão.

#### 4.4 ESPECTROMETRIA DE ABSORÇÃO ATÔMICA

Após a obtenção da curva de calibração do equipamento, foi feita a leitura das amostras da solução de suor artificial e os valores obtidos estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores obtidos a partir das leituras no espectrômetro de absorção atômica.

Amostra	Massa de solução (g)	Concentração (ppm)	Massa de Níquel (µg)
Solução original 1	--	0	0

Amostra	Massa de solução (g)	Concentração (ppm)	Massa de Níquel ( $\mu\text{g}$ )
Solução original 2	--	0	0
Solução original 3	--	0	0
CN - Aparato	17,86	0,0322	0,5751
CN - Tubo de ensaio	6,71	0,0275	0,1845
EUA1 - Aparato	9,14	0,2148	1,9633
EUA1 - Tubo de ensaio	7,11	0,0374	0,2659
EUA2 - Aparato	6,03	0,0163	0,0983
EUA2 - Tubo de ensaio (1)	13,68	0,0093	0,1272

Fonte: Autoria própria.

**Notas:**

(1) Resultado de baixa confiabilidade devido a problemas na leitura.

\*O desvio médio das leituras é de 0,005 ppm.

#### 4.4.1 Cálculo da Área Superficial

Para que seja possível a comparação com os valores da literatura, a massa de níquel deve ser relativa a área superficial da amostra. A Tabela 5 mostra as medidas da espiral de cada uma das cordas obtidas a partir das imagens do estereoscópio, em relação ao esquema mostrado na Figura 31.

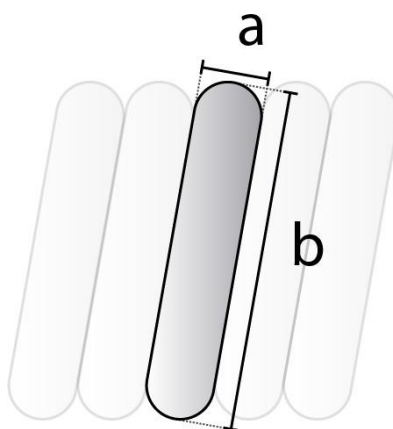


Figura 31 - Esquemática da espiral de uma corda.

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5 - Medidas da espiral da corda.

Marca	a (mm)	b (mm)
CN	0,16	0,68
EUA1	0,16	0,68
EUA2	0,16	0,68

Fonte: Autoria própria.

Pode-se observar que, apesar das diferenças entre as dimensões internas dos componentes, observadas nas imagens do microscópio óptico na seção 4.1, a parte externa das cordas possui as mesmas dimensões.

Para o cálculo da área superficial se considerou apenas a superfície externa da espiral, já que a proximidade entre os componentes prejudica a penetração do suor nas partes mais internas. A equação (4) se refere ao cálculo do perímetro de uma circunferência onde  $r$  é o raio.

$$\text{Circunferência} = 2 * \pi * r \quad (4)$$

Para possibilitar o cálculo dessa forma, a espiral será considerada como uma sequência de argolas. Multiplica-se então o perímetro de meia circunferência, correspondente à seção da espiral que está voltada para a parte externa, pelo perímetro de uma circunferência inteira, que corresponde ao perímetro da argola. Utilizando os termos definidos na Figura 31, a equação (5) mostra a resultante para o cálculo da área externa de uma argola.

$$\text{Área} = 2 * \pi^2 * (a / 2) * (b / 2) \quad (5)$$

O número de argolas pode ser estimado pela divisão do comprimento da corda pela espessura de uma argola, e a área de uma argola multiplicada por esse número resulta na área superficial da corda, descrita como Área 1 na Tabela 6.

Deve-se considerar também a possibilidade de que o tracionamento da corda no aparato possa resultar em um afastamento das argolas de tamanho suficiente para que ocorra a penetração do suor artificial entre elas, e consequente liberação de níquel. Desta forma, a equação da área superficial completa da argola, mostrada na equação (6), deve ser usada. Para isso será considerado  $a$  como o raio menor, e  $b-a$  como o raio maior.

$$\text{Área} = 4 * \pi^2 * (a / 2) * ((b - a) / 2) \quad (6)$$



A área superficial total das argola da corda está descrita como Área 2 na Tabela 6. Esse cálculo não foi aplicado para as amostras que não foram tracionadas, pois as imagens da microscopia óptica mostraram que estas não possuem vãos entre as argolas para a passagem do suor.

Tabela 6 - Dimensões das cordas.

Amostra	Comprimento (cm)	Área 1	Área 2
CN - Aparato	2,8	0,94	1,44
CN - Tubo de ensaio	3,2	1,07	--
EUA1 - Aparato	2,8	0,94	1,44
EUA1 - Tubo de ensaio	3,1	1,04	--
EUA2 - Aparato	3,7	1,24	1,90
EUA2 - Tubo de ensaio	3,0	1,01	--

Fonte: Autoria própria.

#### 4.5 LIBERAÇÃO DE NÍQUEL

Com os dados da massa total de níquel liberada em cada amostra, com a área superficial e com o tempo de ensaio, podemos então dispor os dados sobre a liberação de níquel nas mesmas unidades utilizadas pela literatura, que são de  $\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{semana}$ . Os resultados finais estão dispostos na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados finais do experimento de imersão em solução de suor artificial.

Marca	Massa de Níquel liberada ( $\mu\text{g}$ )	Área superficial ( $\text{cm}^2$ )	Tempo de imersão (semanas)	Liberação de níquel ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{semana}$ ) Área 1	Liberação de níquel ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{semana}$ ) Área 2
CN - Aparato	0,5751	0,94	1,43	0,43	0,28
CN - Tubo de ensaio	0,1845	1,07	1,43	0,12	--
EUA1 - Aparato	1,9633	0,94	1,43	1,46	0,96
EUA1 - Tubo de ensaio	0,2659	1,04	1,43	0,18	--
EUA2 - Aparato	0,0983	1,24	1,43	0,06	0,04

Marca	Massa de Níquel liberada ( $\mu\text{g}$ )	Área superficial ( $\text{cm}^2$ )	Tempo de imersão (semanas)	Liberação de níquel ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{semana}$ ) Área 1	Liberação de níquel ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{semana}$ ) Área 2
EUA2 - Tubo de ensaio	0,1272	1,01	1,43	0,09 (1)	--

Fonte: Autoria própria.

#### Notas:

(1) Resultado de baixa confiabilidade devido a problemas na leitura.

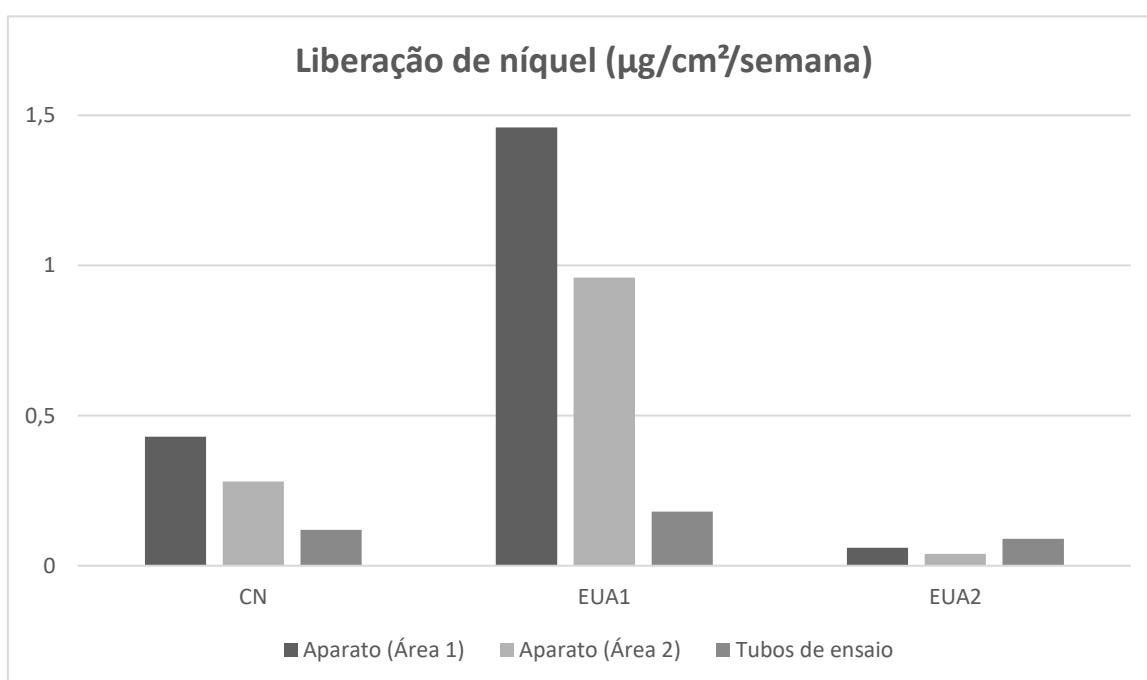


Gráfico 4 - Resultados finais do experimento de imersão em solução de suor artificial.

Fonte: Autoria própria.

Os resultados obtidos mostraram um considerável aumento na liberação de níquel nos encordoamentos das marcas CN e EUA1 ao serem tracionados, inclusive fazendo com que este segundo ultrapassasse os limites estabelecidos pela regulamentação europeia de  $0,5 \mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{semana}$ , mesmo ao se considerar que a solução de suor artificial conseguiria penetrar em toda a área superficial de sua espiral. Apesar disso, não é possível afirmar com toda certeza que este produto estaria realmente fora da norma, já que outros parâmetros desta foram alterados neste trabalho, como a maior acidificação do suor.

A existência de uma proteção na superfície da corda também se mostrou eficaz para a prevenção da liberação de níquel e proteção contra a corrosão. Mesmo

nas etapas iniciais já foi possível notar que as cordas que possuíam alguma camada protetora mostravam maior resistência a corrosão superficial ao se observar a transparência da solução em que se encontravam. As amostras sem essa proteção adquiriram uma aparência alaranjada em sua superfície e na solução, evidenciando que estava ocorrendo a liberação de ferro.

Não foi possível notar uma relação direta entre o custo do encordoamento e sua liberação de níquel para todas as cordas. O revestimento das cordas da marca EUA2, as de maior custo do experimento, que é usado como justificativa para seu custo elevado, se mostrou eficaz na prevenção do contato da corda com os meios externos, prevenindo a corrosão e a liberação de níquel. Já a película que envolve a espiral da corda de menor custo, da marca CN, se mostrou frágil e menos eficiente para sua proteção, o que condiz com seu custo. É importante destacar também que o principal enfoque destes produtos é a sonoridade, portanto já é esperado que proteções e resistência a liberação de níquel não tenham um impacto significativo em seu custo, exceto em casos com as cordas da marca EUA2 que anunciam esses fatores como diferencial.

Alguns fatores podem ter influenciado os resultados finais, como um possível aumento da área superficial devido à tração no componente, a aderência do níquel na superfície dos tubos de ensaio e recipientes, e a qualidade e pureza dos reagentes utilizados. Porém, este trabalho atingiu seu objetivo servindo como um ponto de partida para futuros avanços, além de colocar em foco a questão de como os materiais que o engenheiro utiliza podem afetar a saúde dos usuários.

## 5 CONCLUSÕES

- As condições a que os encordoamentos de guitarras estão expostos puderam ser identificadas e replicadas em um aparato utilizando madeira e componentes retirados de uma guitarra elétrica;
- Através da análise das amostras e das soluções após a imersão das cordas em suor artificial, tanto tracionadas quanto sem tração, foi possível estabelecer um comparativo e comprovar a eficiência do aparato desenvolvido;
- Em uma das amostras houve o indicativo de que, ao ser tracionada, esta possa vir a liberar uma quantidade de níquel acima do permitido pela regulamentação europeia;
- A análise das cordas por microscopia permitiu o levantamento de fatores que podem ter influenciado o resultado final das análises da liberação de níquel das amostras.

### 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar a composição das ligas e os mecanismos de corrosão que afetam a liberação de íons;
- Comparar a liberação de níquel em diferentes tempos de submersão;
- Analisar a resistência dos recobrimentos ao desgaste durante o uso;
- Realizar estudos em encordoamentos que foram utilizados por músicos em condições reais de uso e aperfeiçoar a réplica dessas condições em laboratório;
- Estudar outros elementos e compostos que podem causar reações negativas ao usuário ao serem utilizados em produtos que tenham contato direto com a pele.

## REFERÊNCIAS

ASM INTERNATIONAL HANDBOOK, V. 2. **Properties and selection: Nonferrous alloys and special-purpose materials.** [s.l: s.n.]. v. 2

BOCCA, B. et al. A pilot study on the content and the release of Ni and other allergenic metals from cheap earrings available on the Italian market. **Science of the Total Environment**, v. 388, n. 1–3, p. 24–34, 2007.

D'ADDARIO. **Electric Strings.** Disponível em: <<http://www.daddario.com/DADProductsElectric.Page?ActiveID=1903>>. Acesso em: 19 out. 2016a.

D'ADDARIO. **What is a hexcore, and why is it better?** Disponível em: <<http://www.daddario.com/daddariofaq.page?solutionid=12>>. Acesso em: 19 out. 2016b.

D'ADDARIO. **XL Nickel Wound.** Disponível em: <[http://www.daddario.com/DADProductFamily.Page?ActiveID=3768&familyid=1&productname=XL\\_Nickel\\_Round\\_Wound](http://www.daddario.com/DADProductFamily.Page?ActiveID=3768&familyid=1&productname=XL_Nickel_Round_Wound)>. Acesso em: 19 out. 2016c.

D'ADDARIO. **String Tension 101.** Disponível em: <<http://www.daddario.com/dastringtensionguide.page>>. Acesso em: 23 out. 2016.

FENDER MUSICAL INSTRUMENTS CORPORATION. **American Standard Stratocaster®.** Disponível em: <<http://intl.fender.com/en-BR/guitars/stratocaster/american-standard-stratocaster-rosewood-fingerboard-3-color-sunburst/>>. Acesso em: 19 out. 2016.

FOURNIER, P.; GOVERSL, T. R.; BRUN, A. Euro coins and the potential risk of nickel allergy. **Europhysics News**, n. October, p. 195–198, 2003.

FRIIS, U. F. et al. **Allergic nickel dermatitis caused by playing the guitar: Case report and assessment of nickel release from guitar strings** *Contact Dermatitis*, 2012.

GUITAR ADVENTURES. **Acoustic Guitar Strings.** Disponível em: <<http://www.guitaradventures.com/>>. Acesso em: 23 jun. 2017.

HAUDRECHY, P. et al. Nickel release from 304 and 316 stainless steels in synthetic sweat. Comparison with nickel and nickel-plated metals. Consequences on

allergic contact dermatitis. **Corrosion Science**, v. 35, n. 1–4, p. 329–336, 1993.

HEMINGWAY, J. D.; MOLOKHIA, M. M. The dissolution of metallic nickel in artificial sweat. **Contact Dermatitis**, n. 16, p. 99–105, 1986.

HOSTYNEK, J. J.; MAIBACH, H. **Nickel and the skin: absorption, immunology, epidemiology, and metallurgy**. Boca Raton: CRC Press, 2002.

LIDIJA, C.; UJEVIC, M. Metal ion release from electric guitar strings in artificial sweat. **Corrosion Science**, n. 51, p. 1985–1989, 2009.

MILOŠEV, I.; KOSEC, T. Metal ion release and surface composition of the Cu-18Ni-20Zn nickel-silver during 30 days immersion in artificial sweat. **Applied Surface Science**, v. 254, n. 2, p. 644–652, 2007a.

MILOŠEV, I.; KOSEC, T. Study of Cu-18Ni-20Zn Nickel Silver and other Cu-based alloys in artificial sweat and physiological solution. **Electrochimica Acta**, v. 52, n. 24, p. 6799–6810, 2007b.

OSTBERG, J.; HARTMANN, B. J. The electric guitar – marketplace icon. **Consumption Markets & Culture**, v. 18, n. 5, p. 402–410, 2015.

PELTONEN, L. Nickel sensitivity in the general population. **Contact Dermatitis**, v. 5, n. 1, p. 27–32, 1979.

RODRIGUES, D. F. **Perfil das Respostas aos Testes de Contato em Crianças e Adolescentes. Estudo na Clínica Dermatológica da Santa Casa de Belo Horizonte**. 24 de maio de 2013. 171 f. Dissertação. Belo Horizonte. Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.

ROHDE, R. A. **Metalografia: Preparação de Amostras**. [s.l.: s.n.].

ROLICH, T.; REZIC, I. Estimation of steel guitar strings corrosion by artificial neural network. **Corrosion Science journal**, n. 52, p. 996–1002, 2010.

SCHNUCH, A.; SCHWITULLA, J. Decrease in nickel allergy in women after the second EU nickel directive. **Contact Dermatitis**, v. 69, n. 4, p. 253–256, 2013.

SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R. **Principles of Instrumental Analysis**. 6. ed. Belmont: David Harris, 2007.

SUITS, B. H. **Frequencies for equal-tempered scale, A4 = 440 Hz.** Disponível em: <<http://www.phy.mtu.edu/~suits/notefreqs.html>>. Acesso em: 23 jun. 2017.

WALKER, B. C. **Lab 7: Electric Guitar and Faraday's Law.** Disponível em: <<http://www.physics.udel.edu/~nowak/phys208/Labs/FaradayLaw.pdf>>. Acesso em: 19 out. 2016.