



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
ENGENHARIA DE MATERIAIS



---

ENG 02298 – TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO

**ANÁLISE DE CORROSÃO E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE GLOBOS DE AÇO  
REVESTIDO DE MICROFONES**

Autor: Johnlee Inácio Pacheco

00206370

Professora Orientadora:

Dra. Jane Zoppas Ferreira

Julho de 2017

## AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Jane Zoppas Ferreira, pelas orientações e confiança no trabalho.

À minha mãe, Elisabeti Espindula Inácio, por ter me proporcionado tudo que não teve, sem medir esforços.

À minha namorada, Eloísa Paganini, por todos os anos me apoiando e ajudando nos momentos mais difíceis e aos seus pais, Maria Júlia e Delir.

Ao meu padrasto, Walter Goulart Gorziza, por toda ajuda e incentivo.

Aos amigos Bruno, Raul e Gustavo, pela amizade e por terem me ajudado ao longo do curso inúmeras vezes e também nesse trabalho.

Ao professor Alvaro Meneguzzi, pelos conselhos ao longo de um ano sobre o trabalho.

Ao Lucas Bonan Gomes, por aceitar fazer parte da banca.

Ao Lucas Viegas, pela ajuda com MEV e EDS.

Ao Wilbur, pela ajuda com a parte metalográfica.

Ao André Oliveira, da empresa Fischer do Brasil, por toda a ajuda com as análises de EDXRF.

À Marciele Festa, pela ajuda com a parte de revestimentos.

## ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS .....	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1. Microfones.....	3
3.1.1. Marca e modelo dos microfones .....	4
3.2. Processo de fabricação .....	4
3.2.1. Trefilação.....	5
3.2.1.1. Esferoidização.....	5
3.2.1.2. Tratamento térmico dos fios .....	6
3.3. Aços .....	6
3.3.1. Fases e constituintes do aço .....	7
3.3.1.1. Ferrita.....	7
3.3.1.2. Perlita .....	8
3.3.1.3. Martensita.....	9
3.3.1.4. Bainita .....	10
3.3.1.5. Austenita .....	11
3.3.2. Tratamentos térmicos.....	12
3.3.2.1. Têmpera .....	12
3.3.2.3. Revenido .....	13
3.4. Metalografia.....	13
3.5. Hall Petch.....	14
3.6. Corrosão.....	15
3.6.1. Corrosão galvânica .....	15
3.6.2. Corrosão por frestas.....	15
3.6.3. Corrosão por pites.....	16
3.7. Galvanoplastia.....	17

3.7.1. Fatores que influenciam a eletrodeposição .....	17
3.7.2. Eletrodeposição de Cobre .....	18
3.7.3. Eletrodeposição de Níquel .....	19
3.7.4. Eletrodeposição de Níquel Brilhante .....	19
3.7.5. Eletrodeposição de Cromo .....	20
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	21
4.1. Material.....	21
4.2. Métodos.....	22
4.2.1. Balança analítica de precisão.....	22
4.2.2. Fluorescência de raios X (FRX) .....	22
4.2.3. Lupa esteromicroscópica.....	22
4.2.4. Medição de espessura por espectrometria de fluorescência de raios X .....	22
4.2.5. Compressão .....	23
4.2.6. Metalografia.....	23
4.2.6.1. Embutimento .....	23
4.2.6.2. Lixamento e Polimento .....	24
4.2.6.3. Microscópio ótico.....	24
4.2.7. Microscópio eletrônico de varredura (MEV) .....	24
4.2.8 Espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS).....	24
5. RESULTADO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	25
5.1. Diferença de massa .....	25
5.2. Análise por fluorescência de raios X .....	25
5.2.1 FRX .....	25
5.2.2 Medição da espessura de camada por EDXRF .....	27
5.3. Análise em Lupa Estereomicroscópica.....	29
5.4. Propriedades Mecânicas .....	31

5.5. Análise Metalográfica .....	34
5.5.1. Tamanho de grão .....	40
5.5.2. Tensão de escoamento .....	41
5.6. Teores de Carbono e identificação dos aços .....	42
5.7. MEV e EDS .....	44
6. CONCLUSÕES .....	52
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	54
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Representação de diferentes globos de microfones <sup>6</sup> .	4
<b>Figura 2:</b> Microestrutura Ferrítica <sup>24</sup> .	8
<b>Figura 3:</b> Microestrutura Perlítica <sup>25</sup> .	8
<b>Figura 4:</b> Martensita em forma de ripas. A: microscopia óptica; B: microscopia TEM, .....	10
<b>Figura 5:</b> Microestrutura Bainítica <sup>29</sup> .	11
<b>Figura 6:</b> Grãos austeníticos poligonais <sup>24</sup> .	11
<b>Figura 7:</b> Célula unitária da austenita e martensita <sup>30</sup> .	13
<b>Figura 8:</b> Relação entre o limite de escoamento e o inverso da raiz quadrada do diâmetro do grão ferrítico <sup>34</sup> .	14
<b>Figura 9:</b> Exemplo esquemático de corrosão por frestas <sup>36</sup> .	15
<b>Figura 10:</b> Exemplo esquemático da formação de corrosão em frestas sobre um material passivo <sup>37</sup> .	16
<b>Figura 11:</b> Representação do mecanismo de corrosão por pites <sup>37</sup> .	17
<b>Figura 12:</b> Globos de microfone utilizados como corpos de prova.	21
<b>Figura 13:</b> Representação esquemática do substrato e seu revestimento.	23
<b>Figura 14:</b> Possíveis camadas de revestimento dos globos.	26
<b>Figura 15:</b> Espectro representativo dos elementos presentes nos globos.	27
<b>Figura 16:</b> Região analisada por EDXRF. A: Falsificado Superior; B: Original Superior; C: Falsificado Lateral; D: Original Lateral.	28
<b>Figura 17:</b> Imagens feitas em lupa estereomicroscópica do GF. A: Parte superior; B: Parte superior após 6 meses; C: Parte lateral; D: Parte Lateral após 6 meses.	29
<b>Figura 18:</b> Imagens feitas em lupa estereomicroscópica do GO. A: Parte superior; B: Parte superior após 6 meses; C: Parte lateral; D: Parte Lateral após 6 meses.	30
<b>Figura 19:</b> Gráfico $\sigma \times \epsilon$ baseado nas áreas dos globos.	32
<b>Figura 20:</b> Gráfico $\sigma \times \epsilon$ baseado nas áreas dos fios dos globos.	33
<b>Figura 21:</b> Microestruturas da parte superior do GF. A: aumento de 200X; B, C e D: aumento de 1000X.	35
<b>Figura 22:</b> Microestruturas da parte superior do GO. A: aumento de 200X; B, C e D: aumento de 1000X.	36

<b>Figura 23:</b> Microestruturas da parte lateral do GF. A: aumento de 200X; B, C e D: aumento de 1000X. ....	37
<b>Figura 24:</b> Representação esquemática dos possíveis tipos de aço presentes em diferentes áreas do globo. ....	38
<b>Figura 25:</b> Microestruturas da parte lateral do GO. A: aumento de 200X; B e C: aumento de 1000X; D: aumento de 1500X. ....	39
<b>Figura 26:</b> Regra da alavanca utilizada para o cálculo do teor de Carbono. ....	42
<b>Figura 27:</b> Comparação entre morfologia encontrada e morfologia apresentada na literatura. A: Parte superior do GO; B: Microestrutura encontrada na literatura <sup>59</sup> . ....	44
<b>Figura 28:</b> Porcentagem atômica dos elementos presentes na parte superior, embutida transversalmente, do GF com magnificação de 15000x. ....	44
<b>Figura 29:</b> Porcentagem atômica dos elementos presentes na parte superior longitudinal do GF com magnificação de 450x. ....	45
<b>Figura 30:</b> Porcentagem atômica dos elementos presentes na parte lateral, embutida transversalmente, do GF com magnificação de 30000x. ....	46
<b>Figura 31:</b> Porcentagem atômica dos elementos presentes na parte lateral longitudinal do GF com magnificação de 450x. ....	47
<b>Figura 32:</b> Porcentagem atômica dos elementos presentes na parte superior, embutida transversalmente, do GO com magnificação de 7500x. ....	48
<b>Figura 33:</b> Porcentagem atômica dos elementos presentes na parte superior longitudinal do GO com magnificação de 450x. ....	49
<b>Figura 34:</b> Porcentagem atômica dos elementos presentes na parte lateral, embutida transversalmente, do GO com magnificação de 10000x. ....	50
<b>Figura 35:</b> Porcentagem atômica dos elementos presentes na parte lateral longitudinal do GO com magnificação de 450x. ....	51

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Valores de massa dos globos. ....	25
<b>Tabela 2:</b> Percentual dos elementos encontrados nos dois globos através da técnica de FRX. ....	25
<b>Tabela 3:</b> Valores encontrados a partir da técnica de EDXRF revelando as espessuras dos principais constituintes do revestimento dos globos.....	28
<b>Tabela 4:</b> Diâmetro dos globos medidos com paquímetro.....	31
<b>Tabela 5:</b> Módulo de elasticidade dos globos. ....	33
<b>Tabela 6:</b> Diâmetro médio dos fios dos globos medidos com paquímetro.....	33
<b>Tabela 7:</b> Tamanho médio de grão para as microestruturas dos globos. ....	40
<b>Tabela 8:</b> Valores de tensão de escoamento dos globos. ....	41
<b>Tabela 9:</b> Teor de Carbono presente nos aços.....	42
<b>Tabela 10:</b> Classificação dos aços quanto ao teor de Carbono, Manganês, Fósforo e Enxofre.....	43



## SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

**GO** – Globo original

**GF** – Globo falsificado

**MEV** – Microscopia eletrônica de varredura

**FRX** – Fluorescência de raios X

**EDXRF** – Fluorescência de raios X por Energia Dispersiva

**EDS** – Espectroscopia de raios X por dispersão de energia

**AISI** – American Iron and Steel Institute

**TEM** – Microscopia eletrônica de transmissão

## RESUMO

Globos metálicos compostos por fios tramados são muito usados em microfones de mão, principalmente para performances ao vivo. Seu uso contínuo pode acarretar em quedas acidentais, fazendo-se necessária a fabricação de globos resistentes para preservar a funcionalidade da captação do microfone. Outro problema recorrente é a oxidação do globo provocada pela saliva ou vapor d'água gerado pelo usuário, possibilitando que o microfone perca resistência mecânica ou sua estética original. Para evitar um desempenho inesperado do globo, é necessário um processo de fabricação adequado, correta seleção de materiais, tratamentos térmicos pertinentes e uma eletrodeposição metálica de revestimento eficiente e uniforme, conferindo qualidade ao produto final. O presente estudo comparou dois globos, um original e um falsificado, que busca imitar o mesmo modelo e marca do microfone original. Ao longo de 3 anos de uso dos dois microfones, foi possível notar que o globo original corroeu mais que o globo falsificado, principalmente na parte de contato com a boca do usuário. A partir dessa análise visual, testes foram feitos para descobrir os possíveis fatores que levaram os globos a corroerem de forma divergente e compará-los quanto à sua resistência a esforços mecânicos, relacionando valores obtidos com suas respectivas caracterizações microestruturais. A partir do teste de compressão, constatou-se que o globo original é mais resistente a esforços mecânicos do que o globo falsificado, que fraturou sob tensão. A partir da média dos diâmetros dos fios, constatou-se que os diâmetros menores no globo falsificado podem ter sido um dos fatores responsáveis por sua fratura. Através de análise metalográfica, valores percentuais de Carbono no aço foram encontrados e revelaram que o globo falsificado se tratava de um aço AISI1020 ou AISI1015 na parte lateral e um AISI1010 na parte superior. Já no globo original, foi usado um aço AISI1040 na parte lateral e um aço AISI1045 na parte superior do globo. Através da média dos tamanhos de grãos ferríticos dos globos, a tensão de escoamento foi obtida e revelou que o globo original possui maior tensão de escoamento (211,37 MPa para a parte lateral do globo) do que o globo falsificado (206,25 MPa para a parte lateral e 175,79MPa para a parte superior do globo). Através da técnica de FRX, os elementos encontrados revelaram a presença de Cobre, Níquel e Cromo, sugerindo que os globos passaram por um processo para revesti-los e inibir o processo de corrosão. Uma análise de EDXRF revelou espessuras de cada elemento nos globos, apontando maior espessura de Níquel e Cobre para o globo falsificado e maior espessura de Cromo para o globo original. As análises de MEV e EDS indicaram um revestimento mais espesso e uniforme para o globo falsificado.

Palavras-chaves: corrosão, microfone, globo, revestimento.

## 1. INTRODUÇÃO

Microfones estão presentes diariamente em nossas vidas, em televisores, rádios ou música. Os primeiros microfones começaram a surgir na segunda metade do século XIX e foram usados prioritariamente na transmissão de ondas sonoras por rádio.

O seu princípio baseia-se em converter frequências em sinais elétricos e, possibilitando, assim, sua amplificação, transmissão ou gravação. Essa conversão é realizada por um diafragma e uma bobina, que geralmente são muito sensíveis. Para proteger esse sistema de captação, grelhas metálicas passaram a serem desenvolvidas, sendo constituídas de fios tramados de acordo com a geometria requerida.

A proteção da cápsula sonora dos microfones precisa ser eficiente e é imprescindível que um globo de microfone seja resistente a choques mecânicos e à corrosão, para não afetar o aspecto estético do microfone e assegurar seu desempenho.

Uma das empresas pioneiras na indústria fonográfica é a Shure, que desenvolve microfones para as mais variadas funções. Para microfones super-cardioides, um dos modelos mais procurados é o Beta 58A. Sua grelha é composta por fios de aço tramados em formato de globo, para facilitar sua captação e proteção. Após a conformação e disposição, os fios são revestidos por camadas de Cobre, Níquel e Cromo para tentar inibir o processo de corrosão no aço através de proteção catódica. Por ser um microfone de alto desempenho e elevado custo, réplicas começaram a surgir ao longo do tempo, com menor preço e menor qualidade sonora.

O presente estudo procura estabelecer relações entre a presença de corrosão com as espessuras e continuidade do revestimento nos globos, bem como sua geometria e microestruturas dos aços presentes nos globos com seu comportamento mecânico.

## **2. OBJETIVOS**

Comparar dois globos de microfones (um original e outro falsificado), e identificar as diferenças que permitam:

- averiguar as possíveis causas do surgimento de corrosão;
- identificar o comportamento com relação as propriedades mecânicas;
- sugerir alternativas para aumentar o desempenho geral do globo em caráter estético e protetivo.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. Microfones**

A história do microfone começou com o desenvolvimento do telefone, que foi o dispositivo que permitiu que a voz humana fosse transmitida por um par de fios. No entanto, o termo microfone foi aplicado pela primeira vez ao estetoscópio por Charles Wheatstone em 1827<sup>1</sup>.

A invenção do telefone é creditada a Alexander Graham Bell. O físico alemão Johann Philipp Reis projetou um "transmissor de som" antes de Bell em 1861, mas não era muito eficaz na transmissão de fala inteligível. Bell transmitiu primeiro uma voz humana ao assistente Thomas A. Watson em 10 de março de 1876. O inventor americano Elisha Gray apresentou uma denúncia à patente de Bell afirmando que ele criou a ideia primeiro. No entanto, os tribunais decidiram a favor de Bell, citando o fato de que Alexander Graham Bell tinha notas de pesquisa que levaram à invenção que precediam a reivindicação de Gray<sup>2</sup>. Gray também não conseguiu produzir um modelo operante, no entanto, fundou a Western Electric Company, empresa americana voltada a engenharia elétrica<sup>3</sup>.

Na década de 1920, uma série de pequenas empresas americanas como a Shure Brothers e Electro-Voice, começaram a fazer significantes contribuições para a engenharia e design de microfones. Aplicações gerais, como paginação e reforço de som, exigiam soluções que fossem econômicas para muitos problemas. Desenvolvimento comercial de microfones de capacitores foi, de certa forma, descartado. Então, essas empresas focaram-se principalmente em projetos de bobina móvel. O trabalho de Bauer (1941) foi essencial na produção do microfone Shure unidirecional (padrão cardioide) com base em um único movimento de um elemento da bobina<sup>4</sup>.

O microfone é o primeiro estágio da complexa e prolongada cadeia técnica entre performance ao vivo e reprodução de som em casas ou salas de cinema. Portanto, muita atenção foi dada à qualidade técnica e desempenho destes delicados instrumentos. Microfones baseados em capacitores têm dominado desde 1940 as

gravadoras, quando, então, os primeiros microfones capacitores alemães e austríacos começaram a surgir<sup>4</sup>.

### 3.1.1. Marca e modelo dos microfones

O modelo de microfone usado como referência para o estudo foi o Beta 58A, da marca Shure.

Trata-se de um microfone dinâmico para voz, feito para utilização em sonorização profissional e projetos de gravação em estúdio. Ele mantém um padrão super-cardioide ao longo da sua gama de frequências. Isso garante um alto ganho antes do retorno e máximo isolamento a partir de outras fontes sonoras.

O Beta 58A tem uma resposta de frequência que é ideal para vocais próximos ao microfone. O excelente desempenho deste microfone não é afetado por choques devido a sua construção robusta e sua grade de malha de aço endurecido. As aplicações típicas para o Beta 58A incluem vocais, vozes de fundo e fala<sup>5</sup>.

### 3.2. Processo de fabricação

Superfícies metálicas de microfone possuem geometrias complexas (Figura 1) que fazem com que haja diversos processos de fabricação diferentes.

Serão lembrados aqui alguns processos de fabricação dos diversos microfones.



**Figura 1:** Representação de diferentes globos de microfones<sup>6</sup>.

### **3.2.1. Trefilação**

Os fios de aço perlítico são amplamente utilizados em muitas aplicações industriais, como cabos de aço em pneus automotivos, cabos para pontes suspensas, reforços estruturais no concreto e cabos de aço industriais. Esses fios são fabricados por trefilação para satisfazer a geometria e requisitos estruturais. Os fios trefilados são comumente aplicados para o processo de fabricação subsequente, chamado encadeamento de fios, em que os fios individuais são retorcidos para produzir um aglomerado de fios de aço, para suportar efetivamente a carga externa exercida sobre a estrutura. Os fios de aço perlítico podem fraturar em formato de hélice, conhecido também como delaminação<sup>7,8</sup>.

A ocorrência de fratura por delaminação é um dos principais obstáculos que devem ser superados para aumentar a força dos fios trançados. Portanto, o aumento de resistência à tração alcançável sem fratura de delaminação é uma questão vital para o desenvolvimento dos fios de aço perlítico de alta resistência.

A ocorrência da fratura por delaminação está fortemente relacionada a morfologia da microestrutura do fio trefilado. Devido aos estudos sobre a microestrutura do aço ferrítico-perlítico, a relação de Hall-Petch<sup>9,10</sup> entre a força do fio e o espaçamento interlamelar das estruturas foi sistematicamente estudado por Embury e Fisher<sup>11</sup> e foi confirmado por Langford<sup>12,13</sup>. Para os fios de aços perlíticos, a redução do espaçamento entre grãos conferiu um acréscimo de resistência durante o processamento por trefilação<sup>14</sup>.

#### **3.2.1.1. Esferoidização**

Os fios de aço de médio Carbono são amplamente utilizados para fabricação de peças mecânicas, como parafusos, porcas e rebites. Existem vários processos de produção aplicando forjamento a frio, devendo conferir suficiente trabalhabilidade para impor grandes deformações plásticas sobre o material durante o processo de forjamento<sup>15</sup>.

O recozimento de esferoidação geralmente é aplicado aos fios de aço médio Carbono antes do trabalho a frio. Durante o recozimento de esferoidização, a fase

composta por cementita no fio de aço é transformada em uma morfologia esférica. Essa microestrutura esferoidizada é conhecida por melhorar a trabalhabilidade a frio do material, resultando na redução da carga utilizada para o forjamento durante o processo de fabricação<sup>16</sup>.

Um estudo de Ioana<sup>17</sup> teve como objetivo principal estabelecer o melhor ângulo de aproximação e a sua relação com um comprimento ideal da zona de apoio (na área de rolamento) no processo de estiramento do fio, para um material de fio de aço com 0,5% de C. A comparação entre as forças de trefilamento de acordo com diferentes parâmetros de valores de: ângulo de aproximação e a área de suporte, de acordo com a predição teórica, levam a sua validação.

Na literatura especializada<sup>18,19,20</sup>, foi provado que havia uma relação entre: os estresses radiais desenvolvidos na superfície do fio e o seu valor de recuperação; a dependência do valor de recuperação no grau de redução; o coeficiente de fricção, o semiângulo da matriz e o comprimento do suporte da matriz, a força de elasticidade da barra e seu diâmetro.

### **3.2.1.2. Tratamento térmico dos fios**

Após o processo de trefilação, os fios são submetidos a tratamentos térmicos para alívio de tensões e/ou obtenção de propriedades mecânicas desejadas. Os principais tratamentos utilizados são recozimento para arames de baixo Carbono (para remover efeitos do encruamento) e patenteamento para aços com porcentagem de Carbono maior que 0,25%, equilibrando de maneira mais estável a ductilidade e resistência da microestrutura formada (perlita fina ou bainita)<sup>21</sup>.

### **3.3. Aços**

Os produtos a base de Ferro são amplamente utilizados desde o século XII a.C. graças às suas propriedades e sua ocorrência abundante na natureza. Para obter tais produtos, o homem desenvolveu técnicas de extração e redução do minério, que é encontrado bruto, utilizando fontes combustíveis ricas em Carbono. Observou-se, então, que a adição deste elemento ao minério de Ferro produziu efeitos importantes sobre as propriedades do material obtido. Com isso, originaram-se as ligas a base de



Ferro e Carbono: Ferros fundidos e aços. Atualmente, sabe-se que a principal característica que separa estas ligas, além da quantidade de Carbono, é a capacidade dos aços de se deformarem plasticamente, o que não ocorre com os Ferros fundidos<sup>22</sup>.

Aços são ligas à base de Ferro que devem conter entre 0,008% e 2,11% de Carbono. Estas quantidades limites correspondem, respectivamente, ao máximo de solubilidade do Carbono no Ferro à temperatura ambiente, e a máxima quantidade de Carbono que pode ser dissolvida em Ferro<sup>23</sup>.

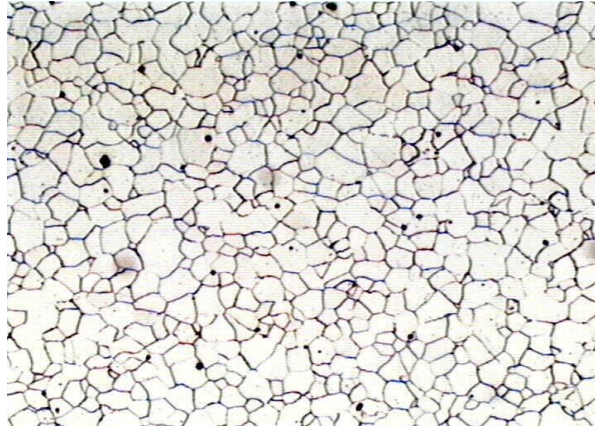
### **3.3.1. Fases e constituintes do aço**

Como o material dos globos de microfone é principalmente o aço, serão aqui definidas as principais fases do aço e as transformações em função do tratamento térmico.

#### **3.3.1.1. Ferrita**

A fase ferrítica ( $\alpha$ -Fe) é formada por uma solução sólida de Carbono em Ferro CCC, com estrutura cúbica de corpo centrado, cuja solubilidade máxima do Carbono no Ferro é de 0,020% na temperatura de 727°C. Também possui uma estrutura de grãos poligonais irregulares, existente até a temperatura de 912°C, observada na Figura 2.

É o constituinte menos duro dos aços, o mais tenaz e o mais maleável, apresentando-se nos aços, ainda, misturada com a cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) para formar parte da perlita<sup>24</sup>.



**Figura 2:** Microestrutura Ferrítica<sup>24</sup>.

### 3.3.1.2. Perlita

A perlita é formada pela união das fases ferrita e cementita, em uma proporção de 88,5% de ferrita para 11,5% de cementita, sendo que o crescimento cooperativo entre as fases se dá sob a forma de lamelas/placas finas paralelas características, podendo ser observadas na Figura 3. A nucleação inicial da cementita é capaz de remover o Carbono contido na austenita ao seu redor, contribuindo para a nucleação da ferrita.



**Figura 3:** Microestrutura Perlítica<sup>25</sup>.

Mesmo se tratando de um constituinte e não uma fase, é possível prever a existência e a proporção de perlita formada através do diagrama Ferro-Cementita. Tratando-se de resfriamentos lentos, aços com menos de 0,77% de Carbono irão

possuir ferrita e perlita em sua microestrutura; com 0,77% C, apenas perlita; e acima de 0,77% C, perlita e cementita. Se considerarmos um resfriamento rápido em água ou óleo, existirá o surgimento de outras fases metaestáveis e que não são previstas pelo diagrama Ferro-Cementita<sup>25</sup>.

### **3.3.1.3. Martensita**

Geralmente, a martensita trata-se de uma solução sólida com alta quantidade de Carbono em ligas Ferrosas. Possui uma estrutura TCC (tetragonal de corpo centrado). Quanto maior for o teor de Carbono, maior será sua tetragonalidade. A martensita, que usualmente é formada pelo tratamento térmico de têmpera, é responsável por um aumento expressivo de dureza no aço<sup>26</sup>.

Quanto mais elementos de liga estiverem presentes (exceto para Cobalto), maior será a temperabilidade do aço, isso é, a capacidade de ocorrer a mudança de morfologia para a martensita. A composição química e especificações do tratamento térmico também interferem na temperabilidade do aço.

Um exemplo onde encontra-se boa temperabilidade são os aços ferramenta, pois geralmente são aços ligados, viabilizando a utilização de taxas de resfriamento suaves para gerar martensita.

As diferentes morfologias martensíticas podem ser comparadas entre microscopia óptica e microscopia eletrônica de transmissão na Figura 4.

### Ripas



a) Microscopia Óptica

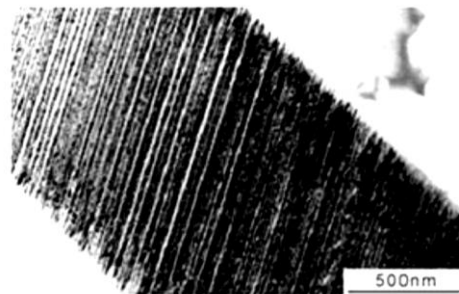


b) Microscopia TEM

### Placas



c) Microscopia Óptica



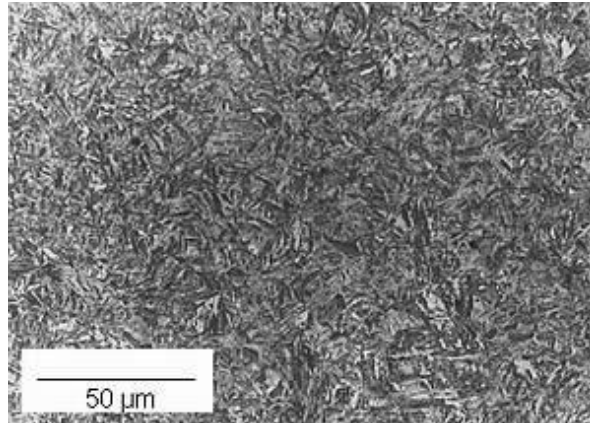
d) Microscopia TEM

**Figura 4:** Martensita em forma de ripas. A: microscopia óptica; B: microscopia TEM, Martensita em forma de placas ou agulhas; C: microscopia óptica; D: microscopia TEM<sup>27</sup>.

#### 3.3.1.4. Bainita

Assim como a perlita, a bainita constitui-se da fase ferrita juntamente com a fase cementita, não caracterizando uma fase e passando por processos de difusão. A bainita pode formar-se na forma de ripas ou placas, dependendo da temperatura. Sua composição se dá por uma matriz de ferrita contornada por partículas alongadas de cementita. Pode, também, ser classificada como bainita superior, onde a temperatura envolvida é alta, ou bainita inferior, onde a temperatura é próxima da temperatura que acarreta na transformação martensítica. As transformações bainíticas e perlíticas não podem coexistir. Uma vez formada, sua transformação no outro constituinte não é mais viável<sup>28</sup>.

A microestrutura bainítica pode ser observada na Figura 5.

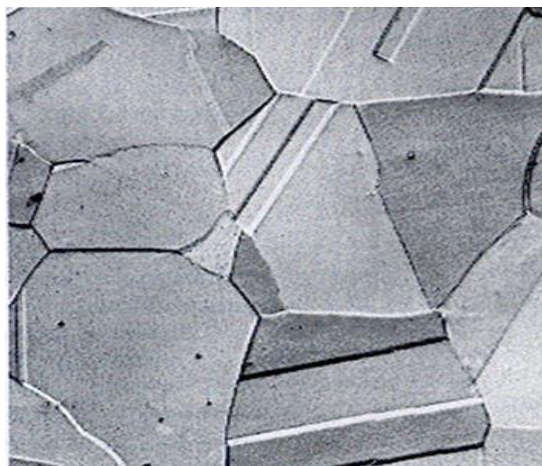


**Figura 5:** Microestrutura Bainítica<sup>29</sup>.

### 3.3.1.5. Austenita

A austenita caracteriza-se por ser uma solução sólida de Carbono em Ferro, com geometria cúbica de face centrada (CFC), cuja solubilidade máxima do Carbono no Ferro é de 2,11% na temperatura de 1148°C. Sendo estável apenas em temperaturas acima de 727°C, possui uma estrutura de grãos poligonais irregulares.

Pode ser analisada em microscópios que operam mesmo em altas temperaturas, pois apenas nessas condições essa fase é estável.



**Figura 6:** Grãos austeníticos poligonais<sup>24</sup>.

### **3.3.2. Tratamentos térmicos**

Tratamentos térmicos são realizados em ligas para promover mudanças nas propriedades do metal, de acordo com a aplicação. A associação de temperatura, tempo, atmosfera e taxa de resfriamento específicos, alteram a microestrutura, tornando o material viável a esforços mecânicos e usinagem, por exemplo.

Recozimento, normalização e têmpera envolvem transformações de fase a partir da austenita. As diversas estruturas possíveis de se obter na transformação da austenita estão associadas a diferentes propriedades, desde o máximo de ductilidade e mínimo de dureza, provenientes de estruturas ferríticas, até elevados valores de dureza e menor ductilidade, associados a martensita<sup>25</sup>.

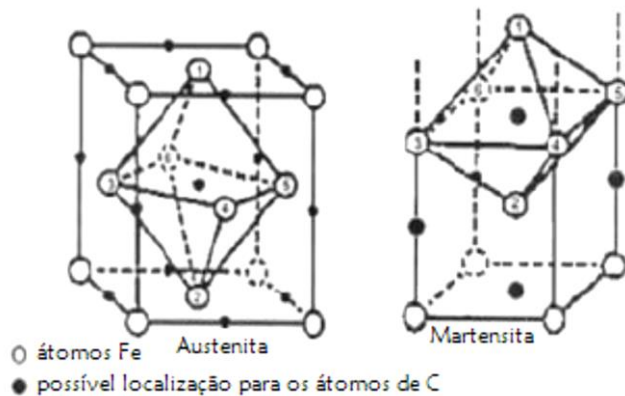
#### **3.3.2.1. Têmpera**

A têmpera consiste na aplicação de uma robusta taxa de resfriamento visando a obtenção de martensita. Após ser solubilizado, o aço é resfriado bruscamente para evitar a formação de austenita retida.

A martensita presente após a têmpera é caracterizada pela alta dureza, menor tenacidade e ductilidade. Dependendo da espessura do aço utilizado, é possível a presença de gradientes de temperatura no aço, principalmente para aços muito espessos. Uma utilização adequada para a têmpera é em situações onde precisa-se de núcleos mais dúcteis e maior dureza superficial<sup>23</sup>.

A têmpera acarreta em uma reorganização espacial da estrutura cristalina, formando martensita. A instabilidade gerada pela fase metaestável está associada a presença de discordâncias, maclas e interfaces entre martensita e austenita quando ela fica retida.

A mudança na geometria espacial ocorrida na transformação de austenita em martensita pode ser observada na Figura 7.



**Figura 7:** Célula unitária da austenita e martensita<sup>30</sup>.

Com o resfriamento muito rápido, podem aparecer tensões no material, podendo levar a trincas e empenamento. Para reduzir esses efeitos, um tratamento posterior é realizado.

Meios de têmpera muito utilizados são em água e óleo. O resfriamento em óleo produz uma taxa menor em relação a água, podendo reduzir a probabilidade de defeitos na peça.

### 3.3.2.3. Revenimento

O revenimento consiste em um tratamento térmico realizado após a têmpera, com aquecimento abaixo da linha crítica ( $727^{\circ}\text{C}$ ), eliminando ou diminuindo as tensões internas, através do fornecimento de energia térmica para que ocorra a difusão do Carbono, bem como a manutenção da dureza para aplicação desejada. O ajuste da dureza se dá de acordo com a temperatura em que será realizado o revenimento. Quanto maior for a temperatura de revenimento, menor será a dureza final do aço<sup>23</sup>.

### 3.4. Metalografia

A análise metalográfica é realizada para avaliar a estrutura, constituição, presença de inclusões e formas de fabricação. Primeiro, a amostra precisa ter uma seção definida para o estudo, depois ela é cortada, desbastada, embutida, lixada, polida e atacada quimicamente para que seja possível observá-la no microscópio. As

amostras também podem ser analisadas por MEV em determinados casos, para análise de superfícies praticamente sem preparação, buscando falhas na amostra.

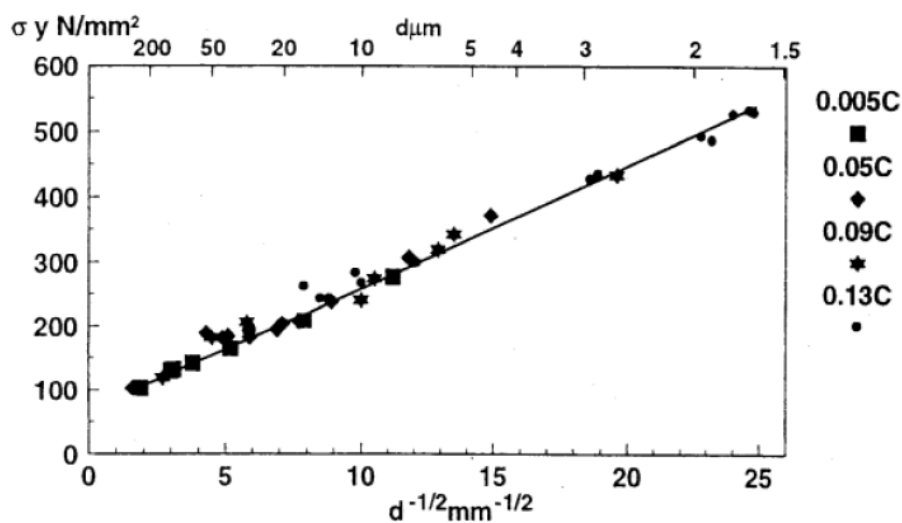
Através da metalografia, é possível observar a microestrutura interna dos metais, fazendo uma relação com a composição química, propriedades físicas e mecânicas da liga ou metal de estudo<sup>22</sup>.

### 3.5. Hall Petch

Hall e Petch estabeleceram, em diferentes trabalhos, uma conexão direta envolvendo o tamanho de grão ferrítico do aço e suas propriedades mecânicas, chegando a equação (A)<sup>31,32</sup>:

$$\sigma_y = \sigma_o + \frac{k_y}{\sqrt{d}} \quad (A)$$

Onde  $\sigma_y$  é o limite de escoamento,  $\sigma_o$  é a resistência intrínseca,  $k_y$  é o coeficiente de resistência de contorno de grão e  $d$  é o tamanho de grão ferrítico. Os parâmetros  $\sigma_o$  e  $k_y$  são constantes experimentais do metal analisado, traçando uma relação linear entre tamanho de grão e o limite de escoamento. A Figura 8 demonstra essa relação existente para vários aços. Porém, ela só é válida para tamanhos de grãos ferríticos maiores que  $1 \mu\text{m}$ <sup>33</sup>.



**Figura 8:** Relação entre o limite de escoamento e o inverso da raiz quadrada do diâmetro do grão ferrítico<sup>34</sup>.



### 3.6. Corrosão

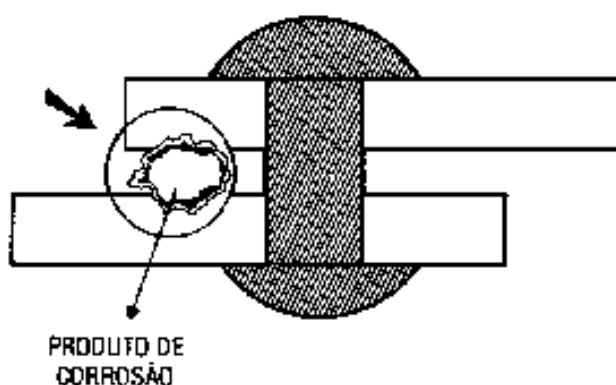
É caracterizada pela deterioração do metal por ação química ou eletrolítica do meio ambiente associado ou não a esforços mecânicos. A interação físico-química entre o material e o meio origina alterações indesejáveis, como desgaste e variações químicas, tornando o material inapropriado para o uso<sup>35</sup>.

#### 3.6.1. Corrosão galvânica

Quando dois metais possuem diferença de potencial eletroquímico e estão em contato direto ou na presença de eletrólito, ocorre corrosão galvânica. Para evitar esse tipo de corrosão, é preciso evitar o contato entre metais com grande diferença de nobreza. Esse contato pode ser evitado utilizando isolantes ou pela deposição de camadas metálicas protetoras<sup>36</sup>.

#### 3.6.2. Corrosão por frestas

Apresenta-se em locais onde existem cavidades ou pequenos espaços onde o eletrólito pode acumular-se. A corrosão por frestas pode ser evitada pela reformulação geométrica da peça antes da sua fabricação. Porém, em alguns casos, não há possibilidade de mudanças espaciais no objeto.

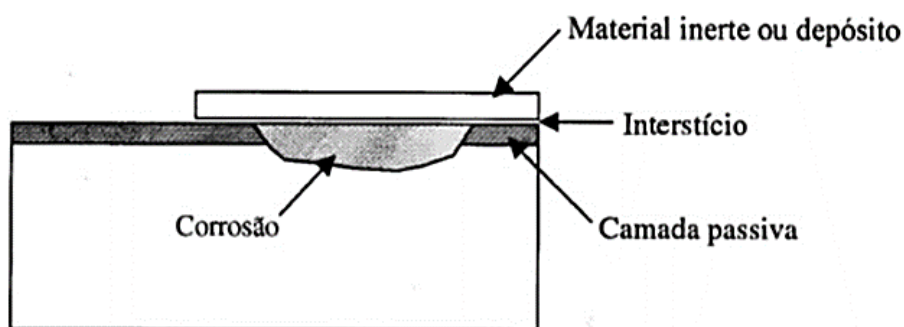


**Figura 9:** Exemplo esquemático de corrosão por frestas<sup>36</sup>.

Ocorre formação de frestas no momento em que o metal fica em contato direto com um mesmo eletrólito<sup>37</sup>. Os lugares mais comuns para esse tipo de corrosão são em: soldas de chapas, juntas com rebites e interstícios em geral. Nesses locais,

existem muitos produtos de corrosão e o seu potencial hidrogeniônico cai bruscamente. A superfície em contato com o eletrólito passa a ter caráter anódico devido à falta de oxigênio e o restante da superfície passa a ter caráter catódico (Figura 10).

O crescimento da corrosão por frestas é muito semelhante a corrosão por pites, porém, ela cresce em largura e não em profundidade.



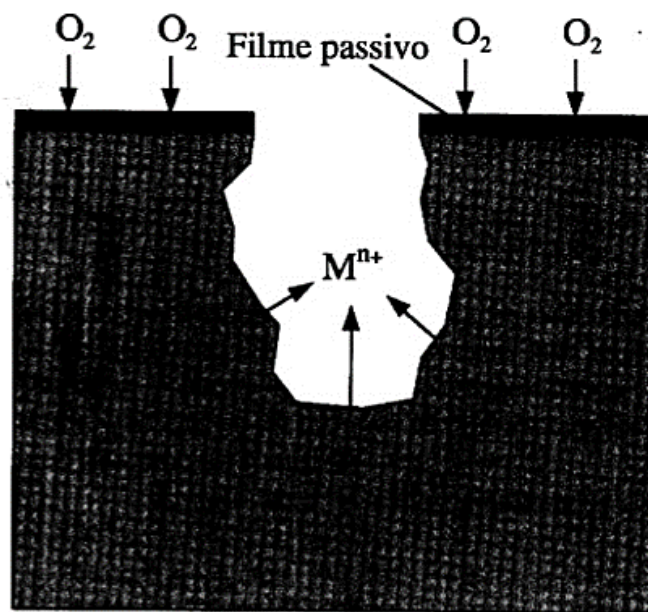
**Figura 10:** Exemplo esquemático da formação de corrosão em frestas sobre um material passivo<sup>37</sup>.

### 3.6.3. Corrosão por pites

Caracteriza-se por ataques isolados, podendo acarretar em uma penetração no interior da peça. A corrosão por pites apresenta-se, principalmente, em meios salinos<sup>36</sup>.

Ao existir descontinuidades na camada de revestimento que passiva o material, existe a possibilidade da presença de corrosão por pites nos pontos descontínuos, podendo ser geradas por defeitos na estrutura metálica, como inclusões ou abrasão<sup>38</sup>.

Com a presença de íons e oxigênio, forma-se uma célula entre o meio externo (catódico e passivo) e o meio interno (anódico e ativo), ligados por um eletrólito<sup>37</sup>.



**Figura 11:** Representação do mecanismo de corrosão por pites<sup>37</sup>.

### 3.7. Galvanoplastia

Utilizando um processo eletrolítico, a galvanoplastia se dá pela deposição de um ou mais metais sobre uma superfície metálica ou polimérica. A peça é imersa em solução com presença de íons provenientes do metal que se deseja depositar somado a uma aplicação de corrente elétrica. Dentre os objetivos desejados com o processo de galvanoplastia, estão: proteger contra corrosão; alterar estética do produto; conferir caráter decorativo; aumentar o tempo de vida útil do material e melhorias em suas propriedades superficiais<sup>39,40</sup>.

#### 3.7.1. Fatores que influenciam a eletrodeposição

Alguns fatores podem afetar diretamente a quantidade de revestimento depositado durante a eletrodeposição. Um dos principais fatores é a densidade de corrente aplicada, medida em amperes por decímetros quadrados. Quanto maior for a densidade de corrente, mais rápida será a deposição do metal sobre o substrato, porém, a alta densidade de corrente pode acarretar em revestimentos menos uniformes, e algumas vezes, com maior porosidade.

A diferença de potencial varia de acordo com a solução eletrolítica que está presente nos tanques de eletrodeposição. Em geral, é preciso aplicar uma corrente maior para superar o sobrepotencial inicial do processo. Porém, aspectos químicos e físicos interferem na obtenção de uma deposição eficiente<sup>35,40,41,42,43,44,45</sup>.

O preparo de uma superfície antes do revestimento influencia diretamente na eficiência do revestimento depositado. Para obter um bom revestimento, é de vital importância que se prepare a sua superfície, pois a maior parte dos defeitos encontrados nos revestimentos se dá por uma má preparação da superfície. Ações como: desengraxe, retirada de material oxidado, limpeza e retirada de umidade fazem com que o substrato seja propício ao depósito de camada para protegê-lo ou para fins estéticos. Os tratamentos superficiais variam de acordo com alguns fatores como: o substrato a ser revestido, objetivo de uso e impurezas presentes.

Porém, é possível que apenas o tratamento superficial do substrato para a aplicação de revestimento não seja capaz de proporcionar a aderência adequada entre o revestimento e o substrato. Essa situação ocorre quando o metal depositado é mais nobre do que o metal que constitui o substrato<sup>46,47,48,49,50,51,52</sup>.

### **3.7.2. Eletrodeposição de Cobre**

Na eletrodeposição do Cobre, o substrato é conectado ao polo negativo da bateria, passando a ser o cátodo e, dessa forma, atraindo os cátions presentes na solução eletrolítica. No polo positivo da bateria é conectado um eletrodo de Cobre, passando a ser o ânodo da célula. Geralmente, o eletrólito usado é uma solução de Sulfato de Cobre. Ao oxidar, o ânodo gera os elétrons necessários para que ele possa reduzir sobre a superfície do cátodo (substrato)<sup>53</sup>.

A deposição de Cobre sobre substratos Ferrosos realizada em banhos ácidos pode gerar o efeito de deslocamento galvânico, característica não desejável, pois prejudica a aderência. Para prevenir esse efeito, deve-se diminuir o potencial de equilíbrio do metal mais nobre, pois quanto menor for a diferença de potenciais de equilíbrio entre os metais, melhor será a aderência do revestimento<sup>38,54</sup>.

### **3.7.3. Eletrodeposição de Níquel**

O Níquel é um dos metais mais importantes aplicados por eletrodeposição. A camada de revestimento é usada principalmente como um revestimento brilhante que pode conter uma subsequente eletrodeposição de Cromo mais fina para fornecer um acabamento altamente brilhante e resistente à corrosão para artigos de aço, latão, fundições sob pressão de Zinco, polímeros quimicamente metalizados e, em menor medida, para revestimentos em ligas de Alumínio e Magnésio.

Os revestimentos de Níquel sozinhos também são usados industrialmente para proteger contra corrosão, evitando a contaminação de um produto. Devido às propriedades mecânicas favoráveis, os eletrodepósitos de Níquel são usados para a montagem de placas de impressão, fonogramas, folhas, tubos, telas e outros artigos<sup>55</sup>.

### **3.7.4. Eletrodeposição de Níquel Brilhante**

Sem uma camada de Cromo sobre o Níquel, o Níquel brilhante protegerá o aço melhor do que o Níquel puro na exposição ao ar livre. A proteção é baseada não na perda de peso, mas na menor tendência de sofrer ataque. A camada de Níquel duplex consiste em uma camada de Níquel sem Enxofre, seguido por uma camada igual ou um pouco mais fina de Níquel contendo Enxofre com 0,03 a 2% de sulfeto que é muito melhor do que apenas o Níquel contendo Enxofre. Com uma camada de Cromo final de 0,25  $\mu\text{m}$ , o Níquel puro é superior ao Níquel brilhante, principalmente porque o padrão de porosidade da camada fina de Cromo é muito mais denso em Níquel brilhante ou não brilhante sem Enxofre do que em Níquel com Enxofre (também por ser mais ativo).

O Níquel brilhante, que não é tão dúctil como o Níquel sem Enxofre, é severamente hidrogenado pela camada de Cromo final e para os artigos revestidos que devem sofrer algumas deformações em uso, especialmente ao ar livre, uma espessura substancial de revestimento de Níquel dúctil semi-brilhante, Cobre dúctil ou ambos, devem ser usados por baixo do revestimento de Níquel brilhante. Estas são também as melhores combinações de revestimento para obter a melhor proteção contra corrosão ao ar livre, especialmente se o revestimento final de Cromo possui poros micrométricos<sup>55</sup>.

As soluções de Níquel contêm aditivos usados para iluminar (fornecer brilho) e nivelar a superfície. Em geral, a definição para utilização de soluções de Níquel brilhante é dependente das propriedades de depósito necessárias, quantidade de nivelamento, custo por quilo de revestimento niquelado e a capacidade do depósito para aceitar Cromo após ser niquelado. Tipos e níveis de agentes de adição escolhido em um sistema podem afetar a capacidade do depósito de Níquel de aceitar uma camada de Cromo. Muitas vezes, o depósito de Níquel pode se tornar ativo ou passivo para aceitar uma eletrodeposição de Cromo<sup>56</sup>.

### **3.7.5. Eletrodeposição de Cromo**

Um depósito de Cromo sobre o substrato é capaz de aumentar a vida útil de peças metálicas submetidas a fricção, abrasão, desgaste e corrosão. As peças podem ser revestidas durante seu processo de fabricação ou até mesmo após a realização de tratamento de peças desgastadas para posterior eletrodeposição<sup>41,42,43,44</sup>.

Uma fina camada de Cromo sobre substrato niquelados é muito utilizada para aprimorar a resistência à corrosão, especialmente em ambientes industriais. Nesse caso, o processo é denominado de Cromo decorativo.

Com base na revisão acima e em função das características do microfone objeto de estudo, os globos foram avaliados a fim de identificar as falhas de processo que originaram a perda de propriedades mecânicas e anticorrosivas.

## 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 4.1. Material

As amostras utilizadas foram dois globos de microfones utilizados por 3 anos com a mesma frequência. Um original, da marca Shure, modelo Beta 58-A lote 5020 (GO), e o outro, um modelo falsificado (GF) do mesmo microfone original. O processo de fabricação do microfone original não é divulgado pela empresa.

Os dois globos apresentam áreas com presença de corrosão, principalmente na parte superior, onde ocorre o contato direto entre a boca do usuário e o globo. A presença de saliva e vapor d'água sobre os fios e sobre a espuma que fica na parte interior do globo, origina um eletrólito, possibilitando a corrosão por frestas, fazendo com que até mesmo a parte interna do globo oxide.

O GO apresenta fortes indícios de corrosão na parte superior, já o GF, apenas em pequenas regiões do globo. O GO foi polido duas vezes na parte superior para remoção de camada oxidada, retirando mais revestimento dessa região. Os dois corpos de prova podem ser observados na Figura 12.



**Figura 12:** Globos de microfone utilizados como corpos de prova.

## **4.2. Métodos**

### **4.2.1. Balança analítica de precisão**

O primeiro método de identificação foi a utilização de uma balança analítica de 3 casas da marca Bel para realizar a pesagem precisa dos dois corpos de prova. A medida foi realizada no Laboratório de Biomateriais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LABIOMAT).

### **4.2.2. Fluorescência de raios X (FRX)**

A fluorescência de raios X é uma técnica não destrutiva que permite identificar os elementos qualitativamente, assim como estabelecer a concentração em que cada elemento se encontra presente na amostra. Foi utilizado um espectrômetro portátil Niton XL3t no Laboratório de Corrosão da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LACOR).

### **4.2.3. Lupa esteromicroscópica**

Foi utilizada uma lupa esteromicroscópica da marca Opticam, modelo OPZT Stardard, no Laboratório de Design e Seleção dos Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LdSM/UFRGS), para verificar de forma macroscópica as partes laterais e superiores do globo e analisar o processo corrosivo atuante nos globos.

### **4.2.4. Medição de espessura por espectrometria de fluorescência de raios X**

Os globos foram enviados para a empresa Fischer do Brasil em São Paulo para serem submetidos a um teste de fluorescência de bancada com intuito de revelar as espessuras em escalas micrométricas de Cobre, Níquel e Cromo presentes nos revestimentos dos globos. O equipamento usado foi o XAN 220 de bancada, detector de Deriva de Silício. O tempo de cada análise foi de 20 segundos para cada ponto e 3 medições foram feitas em cada amostra.



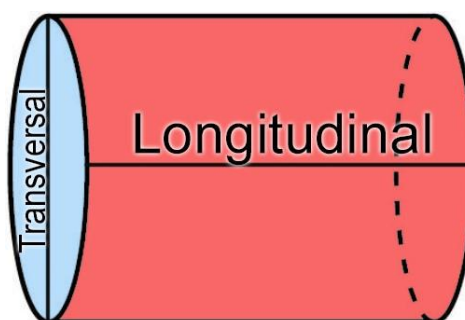
#### 4.2.5. Compressão

No laboratório do GMAp (Grupo de mecânica aplicada) da UFRGS, foi realizado o ensaio de compressão nos dois globos utilizando a máquina de ensaio compressivo WDW-100E, aplicando um esforço normal sobre o material e comprimindo o corpo de prova, podendo ou não ocorrer ruptura.

#### 4.2.6. Metalografia

##### 4.2.6.1. Embutimento

Após o corte dos globos ao meio, fios da parte lateral e superior dos globos (totalizando 4 amostras) foram embutidos a quente com resina fenólica (baquelite) em uma embutidora da marca Struers, modelo CitoPress-5, no Laboratório de Caracterização de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LACAR). Os fios foram posicionados com a parte transversal como área de interesse para a análise metalográfica, uma vez que assim, o revestimento e o substrato pudessem ser analisados, conforme representado na Figura 13.



**Figura 13:** Representação esquemática do substrato e seu revestimento.

De acordo com a Figura 13, a parte circular em azul claro representa o substrato e a parte em vermelho claro representa o revestimento que está protegendo o substrato dos meios corrosivos.

A resina utilizada é resistente ao processo de lixamento, não desprende resíduos na lixa e é resistente ao ataque químico utilizado para revelar a microestrutura.

#### **4.2.6.2. Lixamento e Polimento**

Após embutimento, foi realizado o lixamento em lixas de Carbetto de Silício de granulometria 220, 300, 400 e 600, utilizando água para redução de atrito e a cada troca de granulometria, a amostra era rotacionada em 90°. Foi realizado o polimento no LACAR em uma Politriz, marca Struers, modelo LaboSystem, por cerca de 5 minutos utilizando um pano de polimento de feltro e alumina em suspensão (3  $\mu\text{m}$ ) como abrasivo.

#### **4.2.6.3. Microscópio ótico**

O ataque químico seletivo, com o objetivo de revelar a microestrutura do material, foi feito com Nital 2%, por 2 segundos. Após o ataque, as microestruturas do substrato dos dois globos e a camada de revestimento depositada na periferia dos fios foram observadas em microscópio ótico Zeiss AxioCam ERC 5s no LACAR, com aumento efetivo de 200, 1000 e 1500x.

#### **4.2.7. Microscópio eletrônico de varredura (MEV)**

Utilizando-se o microscópio eletrônico de varredura de bancada da marca Phenom World, modelo ProX, do Laboratório de Materiais Poliméricos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LAPOL), foi possível a obtenção de imagens de resolução micrométrica a centenas de nanômetros da superfície da amostra, analisando as seções transversais e longitudinais dos fios separadamente. Foi utilizada voltagem de 15kV, com ajuste de magnificação para cada caso.

#### **4.2.8 Espectroscopia de raios X por dispersão em energia (EDS)**

Utilizando novamente o microscópio eletrônico de varredura de bancada da marca Phenom World, mas através da microsonda aplicada, foram analisados os raios X emitidos pela matéria após incidência de partículas carregadas, possibilitando a identificação dos elementos químicos presentes no substrato e a diferença de composição ao longo da camada de revestimento. As seções transversais e longitudinais dos fios foram analisadas separadamente, como no MEV.

## 5. RESULTADO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1. Diferença de massa

Os dois globos foram pesados em balança de precisão e os valores de massa foram obtidos. A Tabela 1 indica a diferença de massa entre os dois globos.

**Tabela 1:** Valores de massa dos globos.

	<b>Falsificado (g)</b>	<b>Original (g)</b>
<b>Massa</b>	40,870	46,908

O GO apresentou maior massa ao ser comparado com o GF, indicando diferença de densidade entre os materiais e/ou diferença na espessura dos fios.

### 5.2. Análise por fluorescência de raios X

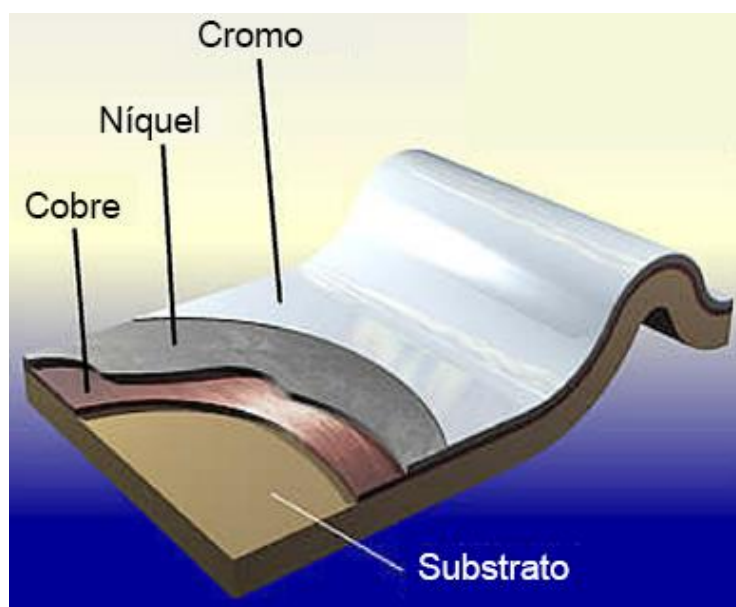
#### 5.2.1 FRX

A partir da análise de fluorescência, foi possível quantificar a porcentagem atômica dos elementos presentes nos globos. Os valores percentuais estão demonstrados na Tabela 2.

**Tabela 2:** Percentual dos elementos encontrados nos dois globos através da técnica de FRX.

<b>Elemento</b>	<b>Falsificado Superior (%)</b>	<b>Original Superior (%)</b>	<b>Original Lateral (%)</b>
<b>Al</b>	0	1,74	0,86
<b>Cu</b>	21,32	22,22	18,77
<b>Ni</b>	59,15	30,98	53,29
<b>Co</b>	0,51	0,36	0,53
<b>Fe</b>	14,67	39,41	22,83
<b>Mn</b>	0,03	0,07	0
<b>Cr</b>	2,70	3,21	3,40
<b>V</b>	0,02	0,01	0
<b>Ti</b>	0,11	0,01	0
<b>S</b>	0,53	0,32	1,13
<b>P</b>	0,37	1,12	0
<b>Si</b>	0,60	0,56	0,20

Os valores encontrados indicam que o material foi revestido, provavelmente, em uma sequência Cobre-Níquel-Cromo, devido aos valores percentuais de Cobre, Níquel e Cromo encontrados. Essa ordem se dá pela diferença de potencial dos metais, dispostos em ordem crescente de nobreza, demonstrados esquematicamente na Figura 14.



**Figura 14:** Possíveis camadas de revestimento dos globos.

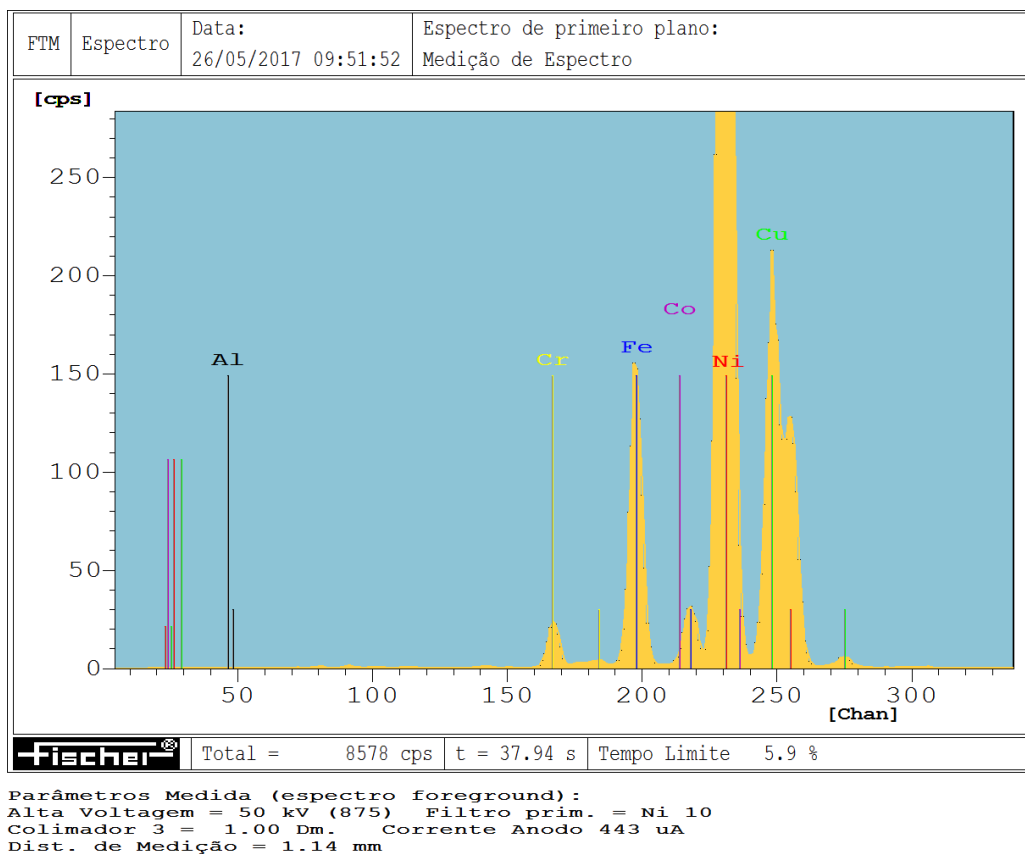
Ao comparar os valores de Ferro e Níquel na parte superior e parte lateral do GO, é possível notar que o polimento realizado no globo para retirar material oxidado acabou retirando parte considerável do revestimento, pois a quantidade de Ferro aumentou e a de Níquel diminuiu após o polimento, proporcionando que o material oxidasse com mais facilidade.

Outra observação pertinente se dá pela comparação da quantidade de Níquel e Cobre entre a parte superior do GF e a parte lateral do GO, revelando que o GF possui maior proporção desses dois elementos que o original, indicando uma camada mais espessa do revestimento sobre o Cobre e proporcionando uma maior resistência à corrosão. Porém, ao considerar as proporções de Cromo, o GO possui maior porcentagem se comparado ao GF, indicando uma camada de Cromo mais espessa.

Essa análise será confirmada pela técnica de EDXRF, específica para determinação de espessura de camada.

## 5.2.2 Medição da espessura de camada por EDXRF

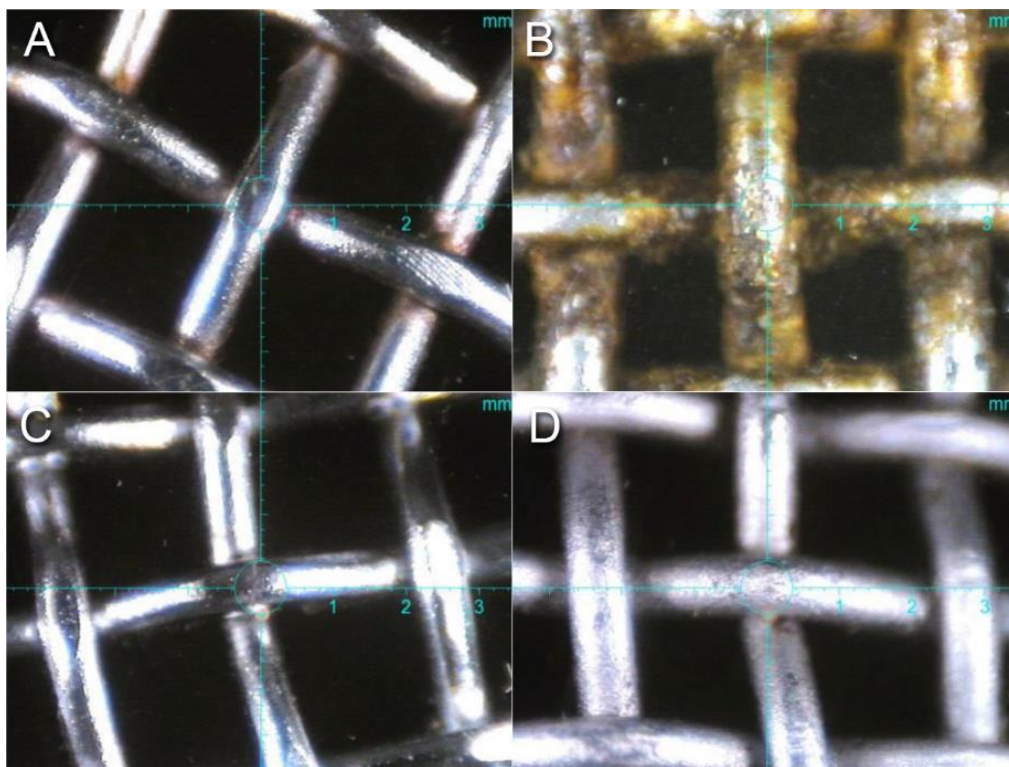
As análises por EDXRF revelaram diferentes espessuras de Cobre, Níquel e Cromo entre os dois globos. Um espectro geral de composição foi construído (Figura 15).



**Figura 15:** Espectro representativo dos elementos presentes nos globos.

Através do espectro, confirma-se a presença de alguns elementos, como Alumínio e Cobalto em pequena quantidade, encontrados através da técnica de FRX. Também é possível observar a predominância de Cobre e Níquel na região espectral, associada ao revestimento.

A Figura 16 mostra a região de análise por EDXRF dos dois globos:



**Figura 16:** Região analisada por EDXRF. A: Falsificado Superior; B: Original Superior; C: Falsificado Lateral; D: Original Lateral.

Os valores de espessura de cada elemento presente no revestimento foram obtidos através de 3 medidas em cada ponto. A média dos resultados estão apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3:** Valores encontrados a partir da técnica de EDXRF revelando as espessuras dos principais constituintes do revestimento dos globos.

Elemento (Análise)	Falsificado Superior ( $\mu\text{m}$ )	Original Superior ( $\mu\text{m}$ )	Falsificado Lateral ( $\mu\text{m}$ )	Original Lateral ( $\mu\text{m}$ )
Cr	0,113	0,169	0,14	0,278
Ni	6,76	1,84	4,95	3,9
Cu	3,57	1,68	2,90	2,22

Os valores de Níquel e Cobre são maiores no GF, indicando uma camada de revestimento mais espessa, protegendo com mais eficiência o substrato.

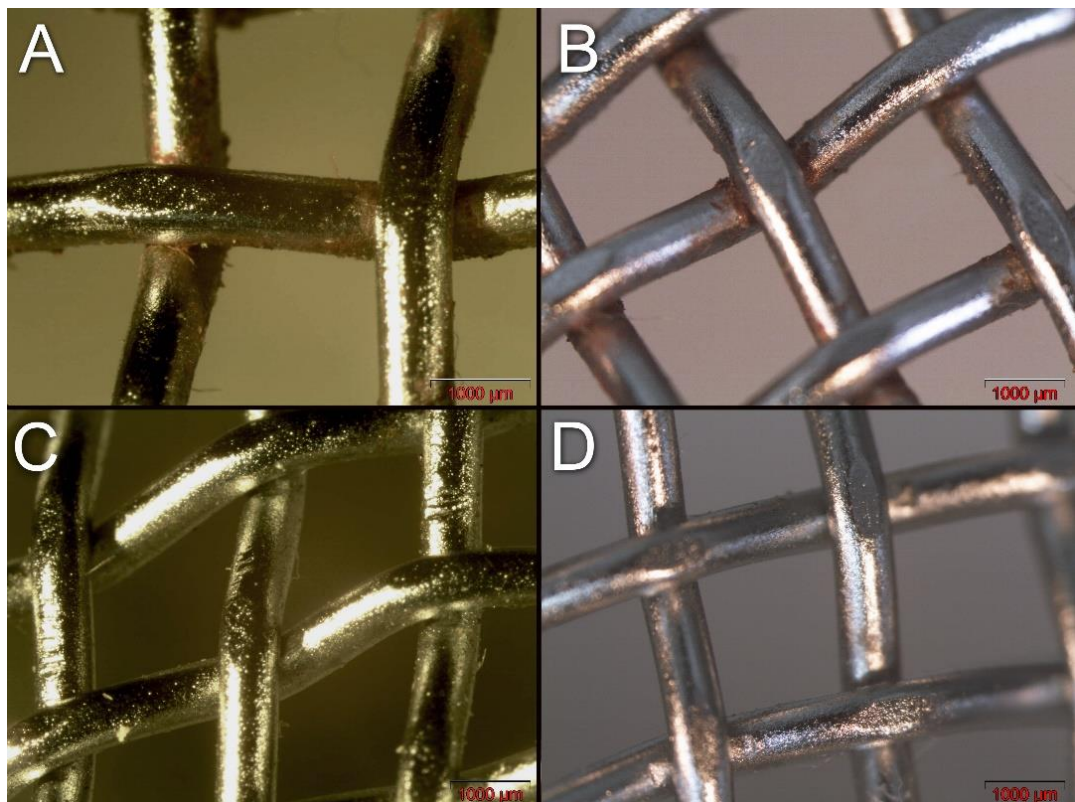
Também como nos valores apresentados na Tabela 2, o Cromo apresentou maior valor para o GO, apresentando maior espessura que o GF, porém, como o Cromo tem baixa eficiência de deposição e seu custo é alto, sua espessura torna-se

pequena ao se comparar a espessura do Níquel e do Cobre, fazendo com que apenas uma eletrodeposição de Cromo com boa eficiência não seja suficiente para evitar a corrosão do material. Provavelmente o Cromo foi depositado predominantemente para um efeito estético, confirmando ser o processo de Cromo decorativo.

Na parte superior do GF, a espessura de Níquel é maior do que na parte lateral do mesmo. Esse fato pode se dar pela diferença de densidade de corrente aplicada na eletrodeposição, visando a parte superior, uma vez que ela é a área mais suscetível à corrosão no globo, devido ao contato direto com a saliva do usuário.

### 5.3. Análise em Lupa Estereomicroscópica

Imagens em lupa estereomicroscópica foram capturadas em dois períodos diferentes para realizar uma comparação macroscópica dos pontos de corrosão nos globos, apresentadas nas Figuras 17 e 18.

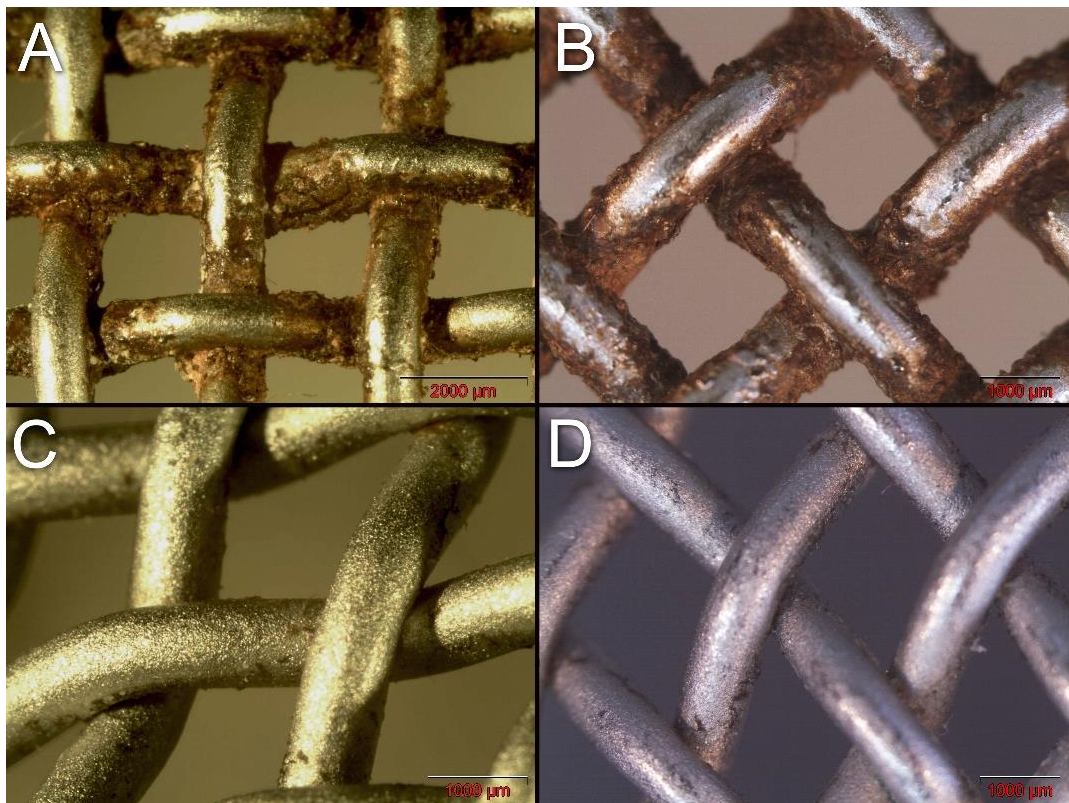


**Figura 17:** Imagens feitas em lupa estereomicroscópica do GF. A: Parte superior; B: Parte superior após 6 meses; C: Parte lateral; D: Parte Lateral após 6 meses.

É possível observar na Figura 17A pontos de corrosão por frestas na área de contato entre os fios. Ao comparar a Figura 17A e a Figura 17B, percebe-se um

pequeno aumento na área corroída. Na Figura 17C e na Figura 17D, não há presença de área corroída.

Esses resultados indicam que os dois globos apresentam muito mais corrosão na parte superior do que na lateral, o que é devido ao ambiente mais agressivo gerado pela saliva presente na parte superior. Entretanto, o GO (Figura 18) apresenta muito mais corrosão do que o GF (Figura 17). Isso se deve ao revestimento de menor espessura no GO. Em ambos a corrosão é predominantemente por frestas.



**Figura 18:** Imagens feitas em lupa estereomicroscópica do GO. A: Parte superior; B: Parte superior após 6 meses; C: Parte lateral; D: Parte Lateral após 6 meses.

Ao observar a Figura 18A, nota-se uma grande área corroída, principalmente nas frestas entre os fios. Ao comparar a Figura 18B com a Figura 18A, nota-se um aumento de área corroída ocasionado pelo uso em condição corrosiva (presença de eletrólito (saliva)) por mais 6 meses. Na Figura 18C e na Figura 18D, pequenos pontos de corrosão são observados, mas sem aumento aparente significativo.



#### 5.4. Propriedades Mecânicas

Através do ensaio de compressão, valores de Força (kN) e deformação (mm) foram obtidos para os dois globos. Através desses valores, foi possível construir curvas de tensão x deformação relacionadas com as áreas dos globos e relacionadas com as áreas dos fios.

A equação para obtenção de tensão usada foi:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Onde  $\sigma$  é a tensão de compressão,  $F$  é a força de compressão e  $A$  é a área da seção do corpo.

Os valores de força em quilonewton foram convertidos para newton e as áreas foram calculadas em milímetros quadrados e convertidas para metros quadrados, resultando em uma tensão em Pascal, que posteriormente foi convertida para megapascal.

A deformação, sendo uma grandeza adimensional, foi calculada usando a seguinte fórmula:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

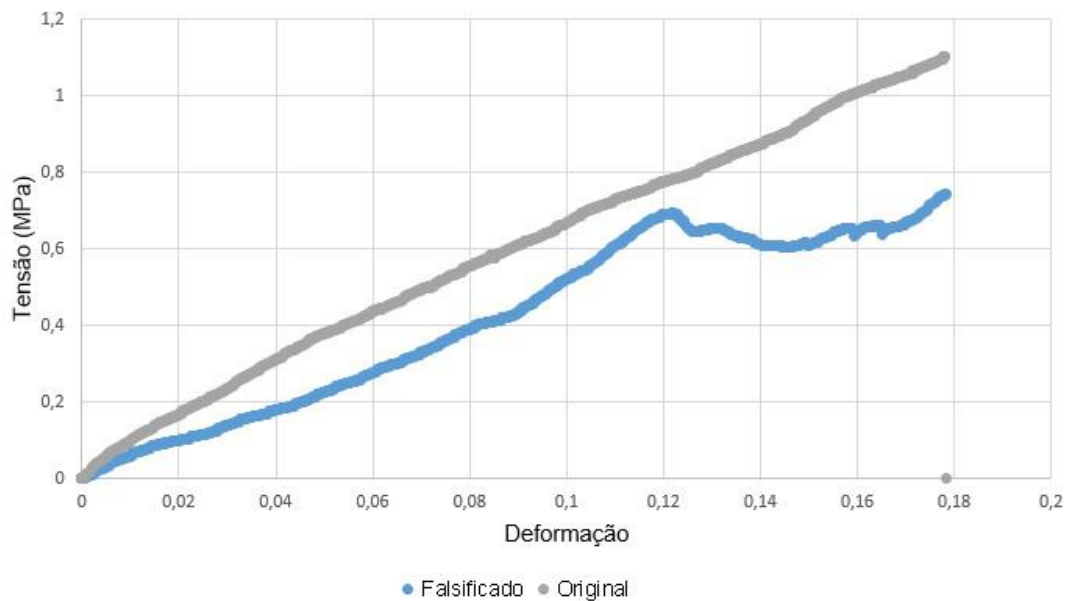
Onde  $\varepsilon$  é a deformação,  $\Delta l$  é a variação de altura e  $l_0$  é a altura inicial do globo.

A primeira curva foi relacionada com as áreas dos globos. O diâmetro dos globos usados para o cálculo de área e tensão podem ser vistos na Tabela 4.

**Tabela 4:** Diâmetro dos globos medidos com paquímetro.

	Falsificado (mm)	Original (mm)
Diâmetro	50,5	51,8

Após os valores de tensão e de deformação serem obtidos, um gráfico foi plotado, usando a área de cada globo para os valores de tensão. O gráfico pode ser observado na Figura 19.



**Figura 19:** Gráfico  $\sigma \times \epsilon$  baseado nas áreas dos globos.

O gráfico contido na Figura 19 demonstra maior tensão ao longo da deformação para o GO, com comportamento linear, indicando uma deformação com maior tenacidade ao compará-lo com o GF. Não houve fratura nos fios, apenas deformação linear na parte superior do globo, sendo esse o comportamento ideal esperado para o globo, preservando a cápsula de captação sonora.

O GF apresentou deformação elástica até a tensão de 0,4MPa, sofrendo uma leve inclinação na curva  $\sigma \times \epsilon$  até chegar em 0,7MPa, onde a carga máxima de tensão foi obtida e o material entrou em sua zona de fluência, ocorrendo a fratura de alguns fios da parte superior, contorcendo-os para o lado interno do globo, sendo esse um ponto negativo para a proteção da capsula de captação que fica na parte interior do globo, pois o fio poderia danificá-la dessa forma.

Usando os valores referentes apenas ao comportamento elástico dos dois globos, foi possível calcular o módulo de elasticidade (Young) de cada globo através da fórmula:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Sendo  $E$  o módulo de elasticidade,  $\sigma$  a tensão aplicada e  $\epsilon$  a deformação do material.

Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5:** Módulo de elasticidade dos globos.

	Falsificado (MPa)	Original (MPa)
Módulo de elasticidade	5,54	6,12

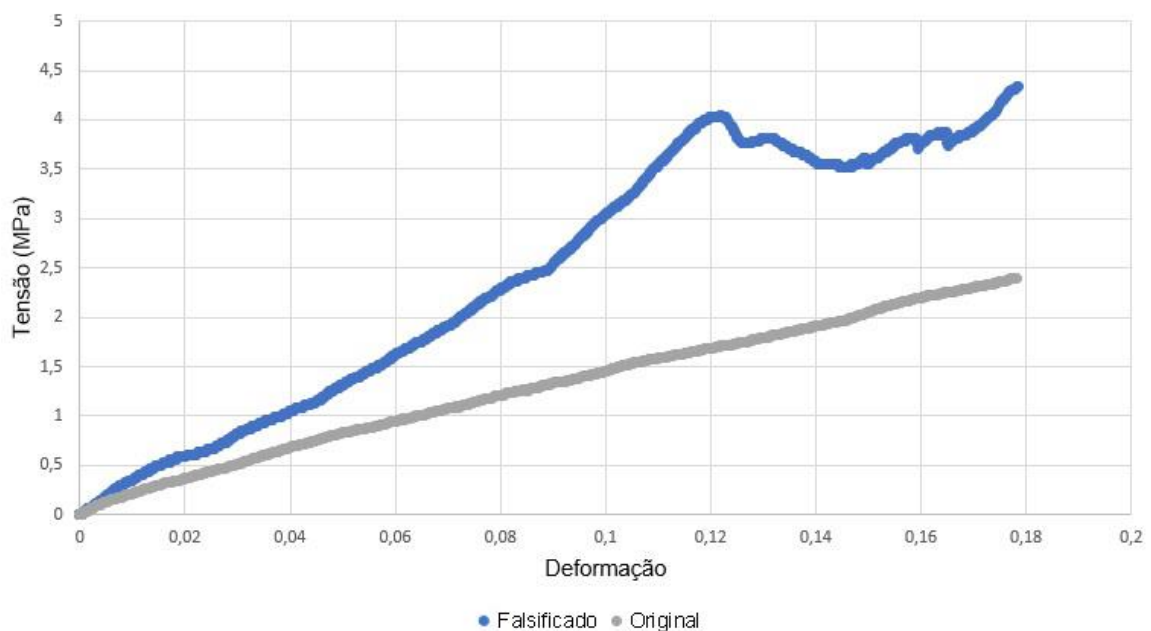
O módulo de elasticidade obtido revela que o GO é mais rígido que o GF ao ser submetido a uma força compressiva, sendo necessária uma maior tensão para deformá-lo.

Porém, é preciso considerar também a espessura dos fios de cada globo para avaliar sua influência nos resultados. Os diâmetros médios das seções transversais dos fios estão apresentados na Tabela 6:

**Tabela 6:** Diâmetro médio dos fios dos globos medidos com paquímetro.

	Falsificado (mm)	Original (mm)
Diâmetro médio	0,66	0,89

A partir dos valores de diâmetro dos fios, novos valores de tensão foram encontrados para verificar a influência dos seus diâmetros no seu comportamento mecânico e podem ser observadas na Figura 20.



**Figura 20:** Gráfico  $\sigma \times \epsilon$  baseado nas áreas dos fios dos globos.

Analisando a Figura 20, percebe-se que os fios do GF estão mais tensionados ao longo da deformação do que os fios do GO. Isso se dá, pois, a tensão é inversamente proporcional a área da seção e, quanto menor for a área, maior será a tensão aplicada. Entretanto, os cálculos foram baseados na espessura de apenas um fio e não condizem com valores reais obtidos pelo globo por tratar-se de um conjunto de fios tramados.

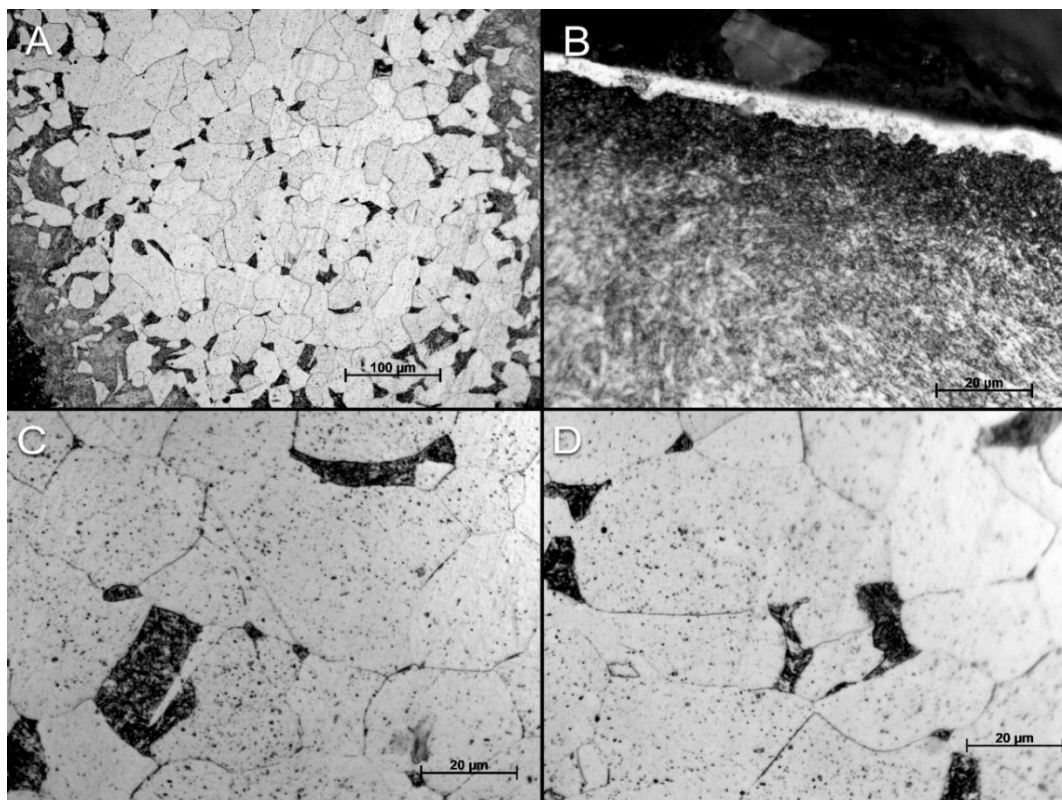
Portanto, o menor diâmetro médio dos fios do GF pode ser um dos fatores que levou o globo a fraturar, ao contrário do GO que possui maior diâmetro médio dos fios e não fraturou.

## **5.5. Análise Metalográfica**

Também foram avaliadas as microestruturas dos substratos dos dois globos, relacionando às microestruturas obtidas com sua respectiva tensão de escoamento através do tamanho de grão e comparando aos valores obtidos no ensaio de compressão.

A análise metalográfica também se faz necessária para avaliar a presença ou ausência de revestimento nas periferias do substrato e, caso haja, sua uniformidade.

A parte superior do GF foi analisada e as microestruturas encontradas estão apresentadas na Figura 21.



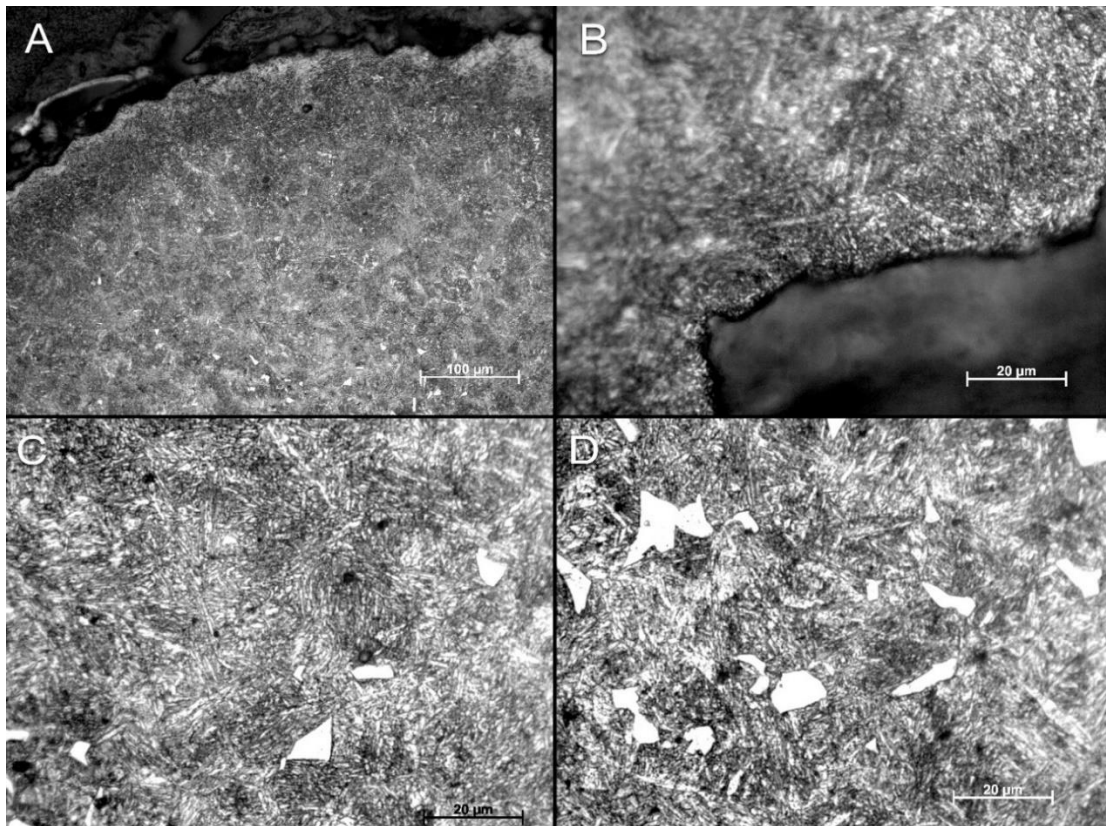
**Figura 21:** Microestruturas da parte superior do GF. A: aumento de 200X; B, C e D: aumento de 1000X.

Ao analisar a Figura 21A, é possível observar grãos claros por toda a microestrutura e pequenos grãos intermitentes de cor mais escura, mas em geral, apresenta grãos claros equiaxiais. Também é possível observar no canto inferior esquerdo e no canto superior direito uma pequena mudança de morfologia em sua microestrutura ao longo da periferia.

Na Figura 21C e na Figura 21D, destaca-se a presença de inclusões e também é possível notar grãos ferríticos com uma pequena presença de grãos perlíticos e/ou bainíticos.

Na Figura 21B, está representada uma imagem da periferia do substrato, revelando uma camada de revestimento uniforme e espessa. Abaixo do revestimento, observa-se uma microestrutura martensítica e/ou bainítica, podendo ser ocasionada pelo alívio de tensões gerados por um suposto tratamento térmico ou por processo de fabricação, ocasionando a formação de martensita devido ao superaquecimento e resfriamento rápido gerado pela abrasão.

A parte superior do GO também foi analisada e as microestruturas encontradas estão apresentadas na Figura 22.



**Figura 22:** Microestruturas da parte superior do GO. A: aumento de 200X; B, C e D: aumento de 1000X.

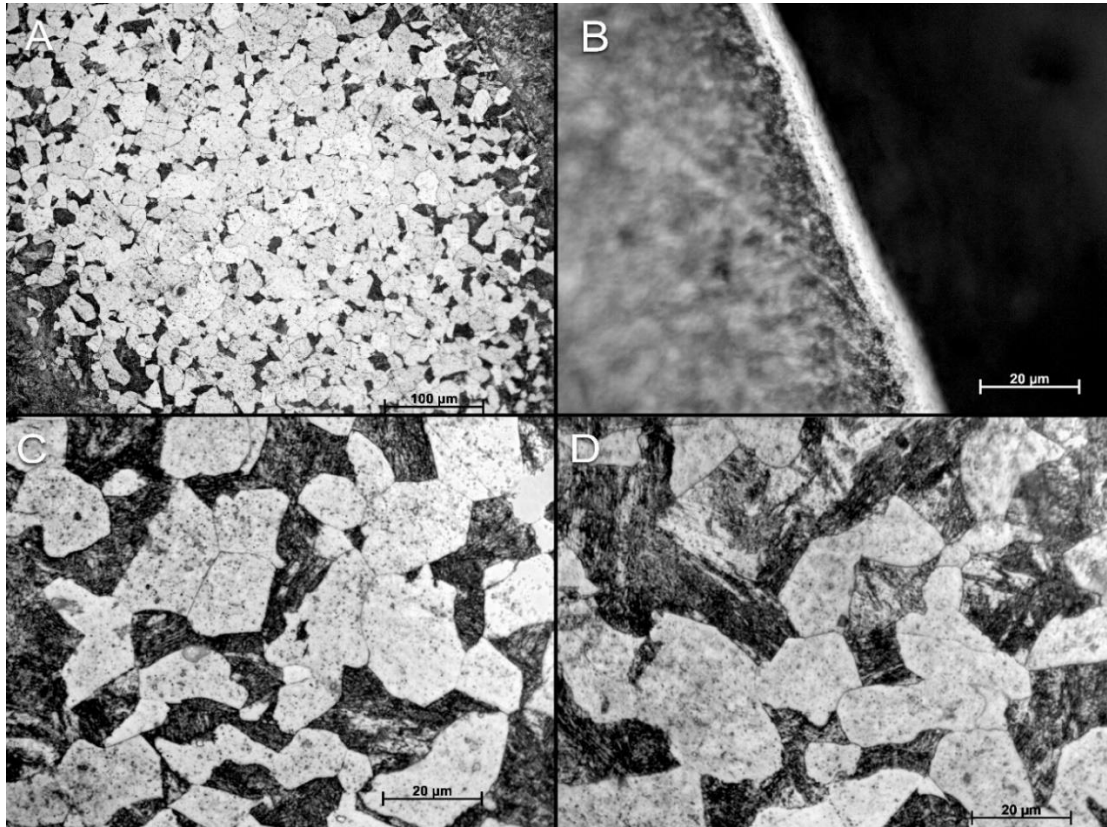
Na Figura 22A, observa-se uma fase metaestável sem contornos de grão definidos, possivelmente originada por um tratamento térmico com resfriamento mais brusco.

As imagens obtidas na Figura 22C e na Figura 22D indicam uma microestrutura martensítica revenida e/ou bainítica com austenita retida ou ferrita com carbeto. Ao comparar as morfologias das partes superiores dos dois globos, existe um indício de que o GO possui maior resistência mecânica por tratar-se de uma estrutura martensítica e/ou bainítica, que geralmente é a fase mais dura do aço por conter maior quantidade percentual de Carbono.

Na Figura 22B, na periferia da peça embutida, observa-se que praticamente não há presença de revestimento. A ausência da camada pode ser explicada pelo

polimento superficial para retirada de material corroído durante o uso do globo ou pela deterioração do revestimento devido a corrosão.

As microestruturas da parte lateral do GF estão apresentadas na Figura 23.



**Figura 23:** Microestruturas da parte lateral do GF. A: aumento de 200X; B, C e D: aumento de 1000X.

Ao analisar a Figura 23A, é possível observar grãos claros equiaxiais por toda a microestrutura e pequenos grãos intermitentes de cor mais escura. Porém, ao comparar com a parte superior do GF (Figura 21A), é possível notar uma maior quantidade de grãos interlamelares escuros.

Na Figura 23B, é mostrada uma imagem da periferia do substrato, revelando uma camada de revestimento ainda mais uniforme do que na parte superior do GF. A continuidade regular do revestimento condiz com o fato de a camada lateral do GF praticamente não apresentar pontos corroídos. Essa continuidade pode ser ocasionada por uma baixa densidade de corrente aplicada durante sua deposição<sup>35,40,41,42,43,44,45</sup>. A morfologia da microestrutura presente abaixo do revestimento, assim como na parte superior do GF, também aparenta ser martensítica

e/ou bainítica e possivelmente gerada por alívio de tensões na abrasão ocasionada pela trefilação dos fios e/ou por tratamento térmico.

Na Figura 23C e na Figura 23D, é possível notar a presença de inclusões e grãos ferríticos com presença de grãos perlíticos e/ou bainíticos mais acentuada do que na parte superior do GF e a diminuição dos tamanhos de grãos ferríticos ao comparar a parte lateral do GF com a parte superior do mesmo.

Porém, o aumento do número de grãos perlíticos sugere um aumento no teor de Carbono do aço, fazendo surgir a hipótese de que haja dois tipos de aço por globo ou com diferentes tratamentos térmicos, conforme representação na Figura 24.

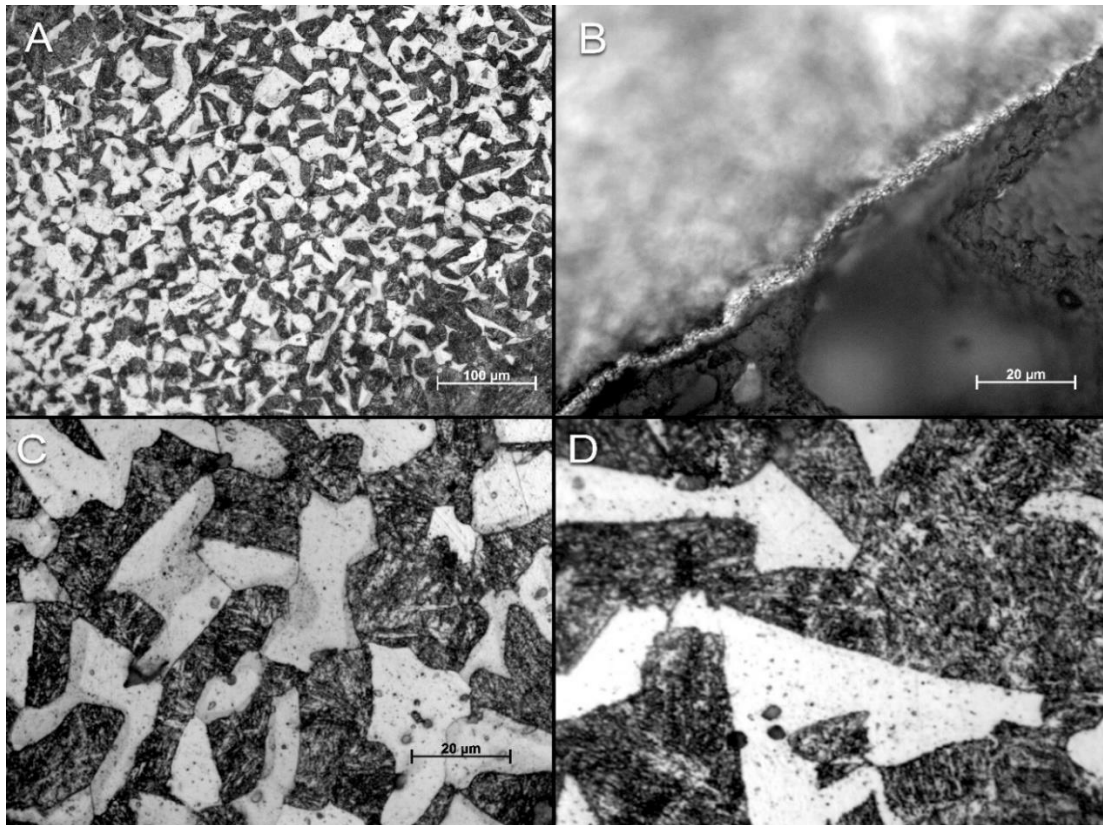


**Figura 24:** Representação esquemática dos possíveis tipos de aço presentes em diferentes áreas do globo.

As diferentes microestruturas sugerem que os aços foram soldados separadamente ao aro localizado na parte central do globo após serem trefilados e conformados.

As microestruturas da parte lateral do GO estão apresentadas na Figura 25.





**Figura 25:** Microestruturas da parte lateral do GO. A: aumento de 200X; B e C: aumento de 1000X; D: aumento de 1500X.

Ao analisar a Figura 25A, percebe-se uma diferença considerável entre a proporção entre grãos claros e escuros ao comparar com as microestruturas do GF, apresentando uma maior incidência de grãos escuros e com maiores tamanhos, indicando tratar-se de um aço com maior teor de Carbono do que o aço presente no GF. No canto inferior esquerdo e superior direito nota-se a presença de mudança de morfologia comparada a parte central do mesmo, podendo ser causada por alívio de tensões durante a trefilação.

Entretanto, a maior diferença encontrada foi ao realizar a comparação morfológica das microestruturas presentes na parte superior e parte lateral do GO, revelando um aço com menor proporção de Carbono na parte lateral do globo e maior proporção na parte superior. Através dessa comparação, há um indício de que os fios superiores passaram por um tratamento térmico voltado ao aumento de dureza, como normalização ou têmpera, para que a parte superior do globo fosse mais resistente a choques mecânicos e a parte lateral fosse um pouco mais tenaz do que a superior no intuito de proteger a capsula de captação sonora da melhor forma.

Na Figura 25B, nota-se uma camada de revestimento muito menos espessa e menos uniforme do que a camada do GF, indicando uma eletrodeposição com menor quantidade de material depositado e um substrato com maior tendência a sofrer corrosão.

Na Figura 25C e na Figura 25D, revelam-se grãos ferríticos (com inclusões), perlíticos e bainíticos, com tamanhos de grão ferríticos menores do que os apresentados nas microestruturas do GF.

### 5.5.1. Tamanho de grão

O tamanho médio de grão ferrítico precisou ser calculado para o cálculo da tensão de escoamento.

Utilizando o método do intercepto linear (Heyn), foi possível obter a média dos tamanhos de grão ferríticos do GF e da parte lateral do GO. A medida de tamanho de grão não pode ser feita na parte superior do GO por se tratar de uma fase metaestável (martensita e bainita), os tamanhos de grão e teor de Carbono não podem ser calculados.

A fórmula usada para obter a média dos tamanhos de grão foi:

$$\bar{L} = \frac{n \cdot L_t}{N \cdot M}$$

Sendo  $n$  o número de linhas-teste usadas na estimativa,  $L_t$  o comprimento da linha-teste em milímetros,  $N$  o número de intersecções dos contornos de grãos ferríticos com as linhas-teste e  $M$  a ampliação usada na micrografia.

Os valores médios de tamanho de grãos estão apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7:** Tamanho médio de grão para as microestruturas dos globos.

	Falsificado Lateral (µm)	Falsificado Superior (µm)	Original Lateral (µm)
<b>Tamanho de grão médio</b>	17,26	28,63	14,46

### 5.5.2. Tensão de escoamento

A partir das médias de tamanho de grão, a tensão de escoamento pôde ser encontrada. O tamanho de grão ferrítico está atrelado a sua resistência mecânica e pode ser descrito pela equação de Hall-Petch:

$$\sigma_y = \sigma_o + \frac{k_y}{\sqrt{d}}$$

Os valores de tensão de escoamento foram calculados e apresentados na Tabela 8.

**Tabela 8:** Valores de tensão de escoamento dos globos.

	<b>Falsificado Superior (MPa)</b>	<b>Falsificado Lateral (MPa)</b>	<b>Original Lateral (MPa)</b>
<b>Tensão de Escoamento (<math>\sigma_y</math>)</b>	175,79	206,25	211,37

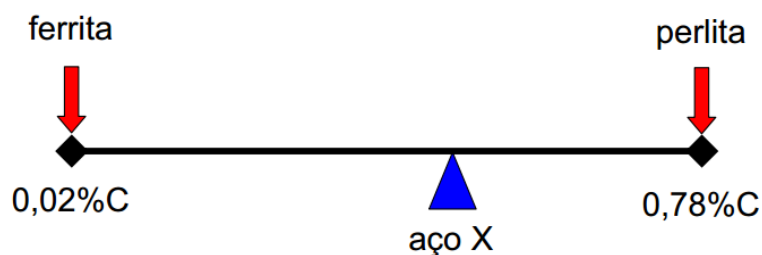
Os valores de limite de escoamento indicam a influência do tamanho de grão ferrítico na resistência mecânica dos globos. O GF, assim como no teste de compressão, apresentou menor limite de escoamento do que o GO. O maior refino de grão ferrítico no GO pode ter contribuído para o resultado obtido no ensaio mecânico.

Porém, é preciso salientar a diferença dos valores obtidos na equação de Hall-Petch para os valores obtidos no ensaio de compressão. Os valores tabelados de  $\sigma_o$  e  $k_y$  são obtidos em condições de ensaio com corpos de prova uniforme e maciços, diferentemente do caso dos globos, onde são compostos por geometrias ocas e fios tramados, ocasionando a diferença nos valores de tensão encontrados. Também é preciso considerar o valor das constantes utilizadas, que são baseados em outros estudos<sup>57</sup>, mas que podem variar de acordo com a instrumentação de medidas e elementos de liga presentes no aço, por exemplo.

## 5.6. Teores de Carbono e identificação dos aços

Os teores de Carbono foram calculados através da utilização do Software Adobe Photoshop CS6, que possibilitou a obtenção da proporção [Perlita] / [Ferrita + Perlita] através da seleção de pixels pretos e da ferramenta histograma e posterior divisão pelo número total de pixels de cada imagem.

Para o cálculo do teor de Carbono, foi utilizada a regra da alavanca, esquematizada e representada na Figura 26:



**Figura 26:** Regra da alavanca utilizada para o cálculo do teor de Carbono.

Os valores de teor de Carbono obtidos estão apresentados na Tabela 9.

**Tabela 9:** Teor de Carbono presente nos aços.

	Falsificado Lateral (%)	Falsificado Superior (%)	Original Lateral (%)
Teor de Carbono	0,15	0,10	0,38

A partir dos valores de teor de Carbono encontrados, foi possível classificar os aços encontrados. Os percentuais de Carbono encontrados no GF classificam o aço como baixo Carbono (< 0,3%C). O GO trata-se de um aço médio Carbono (entre 0,3 e 0,6%C). Os valores percentuais de Carbono no aço podem nos indicar qual é o aço encontrado em cada parte do globo através da consulta realizada na Tabela 10.

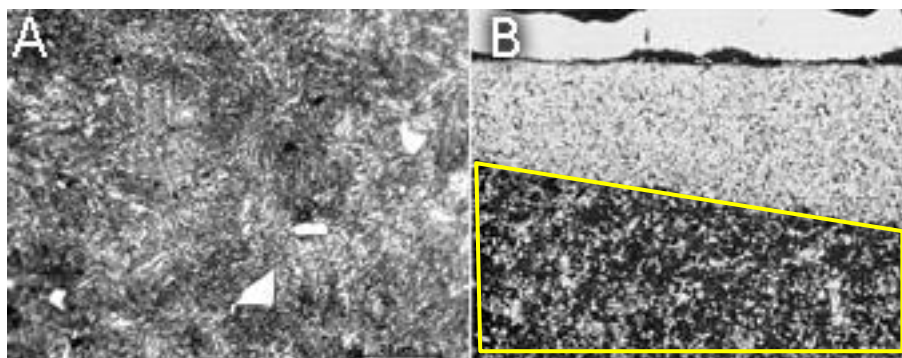
**Tabela 10:** Classificação dos aços quanto ao teor de Carbono, Manganês, Fósforo e Enxofre<sup>58</sup>.

Nonresulfurized Grades					
AISI No.	Composition *, %				SAE No.
	C	Mn	P Max	S Max	
1010	0.08 to 0.13	0.25 to 0.40	0.040	0.050	1010
1011	0.08 to 0.13	0.30 to 0.50	0.040	0.050	1011
1012	0.10 to 0.15	0.30 to 0.60	0.040	0.050	1012
1013	0.11 to 0.16	0.50 to 0.80	0.040	0.050	1013
1013	0.10 to 0.16	1.10 to 1.40	0.040	0.050	1013
1015	0.13 to 0.18	0.30 to 0.60	0.040	0.050	1015
1038	0.35 to 0.42	0.60 to 0.90	0.040	0.050	1038
1039	0.37 to 0.44	0.70 to 1.00	0.040	0.050	1039
1040	0.37 to 0.44	0.60 to 0.90	0.040	0.050	1040
1541	0.36 to 0.44	1.35 to 1.65	0.040	0.050	1541
1042	0.40 to 0.47	0.60 to 0.90	0.040	0.050	1042
1043	0.40 to 0.47	0.70 to 1.00	0.040	0.050	1043
Free-Machining Grades					
AISI No.	Composition *, %				SAE No.
	C	Mn	P	S	
Resulfurized					
1108	0.08 to 0.13	0.50 to 0.80	0.040 max	0.08 to 0.13	1108
1109	0.08 to 0.13	0.60 to 0.90	0.040 max	0.08 to 0.13	1109
1110	0.08 to 0.13	0.30 to 0.60	0.040 max	0.08 to 0.13	1110
1116	0.14 to 0.20	1.10 to 1.40	0.040 max	0.16 to 0.23	1116
1117	0.14 to 0.20	1.00 to 1.30	0.040 max	0.08 to 0.13	1117
1118	0.14 to 0.20	1.30 to 1.60	0.040 max	0.08 to 0.13	1118
1119	0.14 to 0.20	1.0 to 1.30	0.040 max	0.24 to 0.33	1119
1139	0.35 to 0.43	1.35 to 1.65	0.040 max	0.13 to 0.20	1139
1140	0.37 to 0.44	0.70 to 1.00	0.040 max	0.08 to 0.13	1140
1141	0.37 to 0.45	1.35 to 1.65	0.040 max	0.08 to 0.13	1141

As caixas em vermelho correspondem aos possíveis aços para o GF e as caixas em verde para os possíveis aços para o GO de acordo com os teores de Carbono encontrados pela regra da alavanca.

Através de comparações visuais feitas em micrografias presentes na literatura<sup>59</sup>, os aços presentes no GF aparentam ser um aço AISI1010 na parte superior e um aço AISI1015 ou AISI 1020 na parte lateral.

O GO possui morfologia semelhante a um aço AISI1040 na parte lateral e a um aço AISI1045 (austenitizado por 3h a 900°C, resfriado e temperado por 2 horas a 205°C) na parte superior.

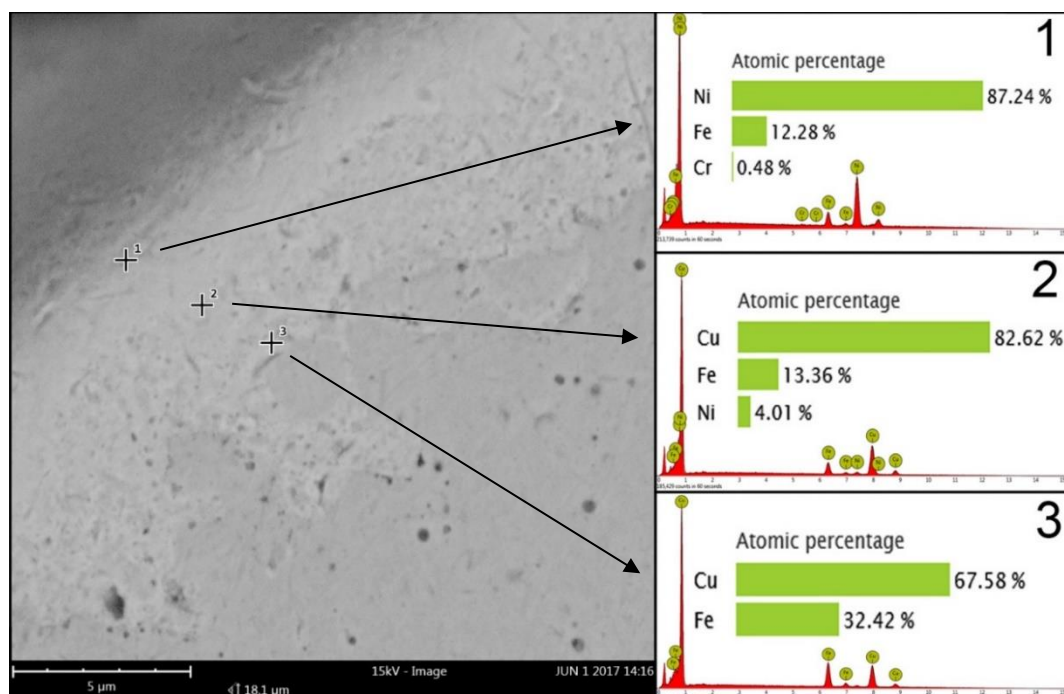


**Figura 27:** Comparação entre morfologia encontrada e morfologia apresentada na literatura. A: Parte superior do GO; B: Microestrutura encontrada na literatura<sup>59</sup>.

### 5.7. MEV e EDS

As análises dos fios do globo por MEV e EDS foram divididas entre análise do revestimento das peças embutidas na transversal e análise da seção longitudinal.

A primeira amostra analisada foi a área transversal da parte superior do GF, representada na Figura 28.



**Figura 28:** Porcentagem atômica dos elementos presentes na parte superior, embutida transversalmente, do GF com magnificação de 15000x.

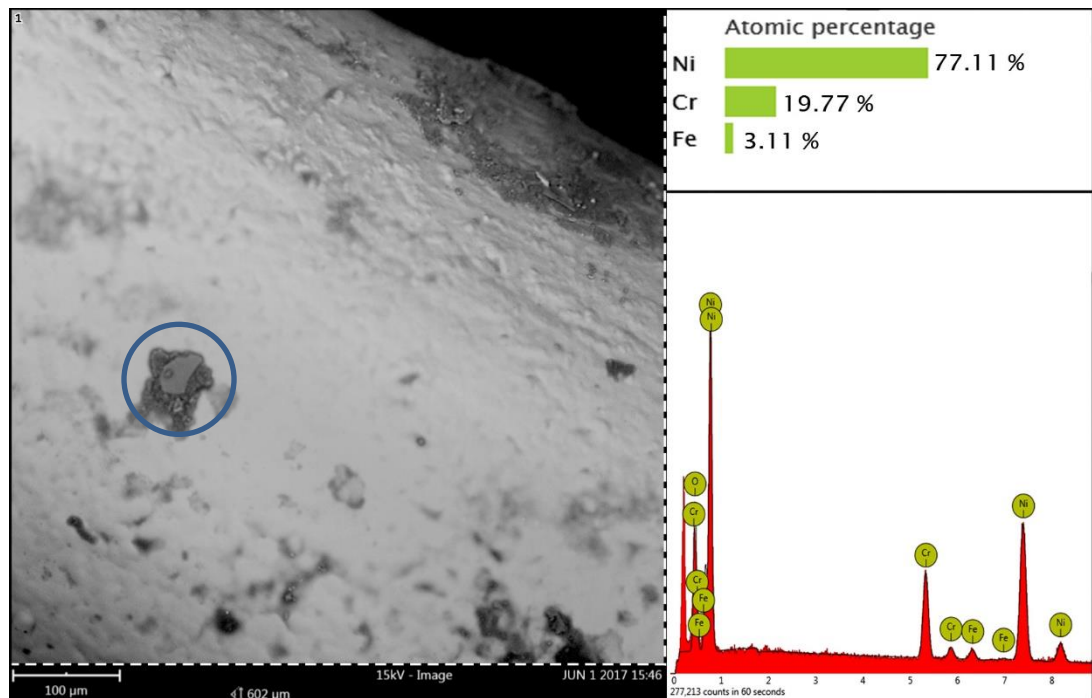
Primeiramente, a seção transversal contendo substrato e revestimento foi analisada.

O ponto 1, localizado na extremidade da periferia da seção transversal do fio, indicou uma alta porcentagem de atômica de Níquel (87,24%) e a presença de Cromo (0,48%), evidenciando a niquelação ocorrida no globo, seguida de Cromo decorativo.

O ponto 2, localizado no meio do revestimento, apresentou alta porcentagem atômica de Cobre (82,62%). Ao comparar com o ponto 1, a porcentagem atômica de Níquel diminuiu (de 87,24% para 4,01%), indicando uma correta eletrodeposição do revestimento de Níquel sobre o de Cobre.

O ponto 3, localizado na base do revestimento, apontou apenas Cobre e Ferro (66,58% e 32,42%, respectivamente), reforçando ainda mais a presença adequada das camadas ao longo do revestimento, pois não foi encontrado Níquel no ponto 3.

A Figura 29 revelou os resultados encontrados na seção longitudinal da parte superior do GF.

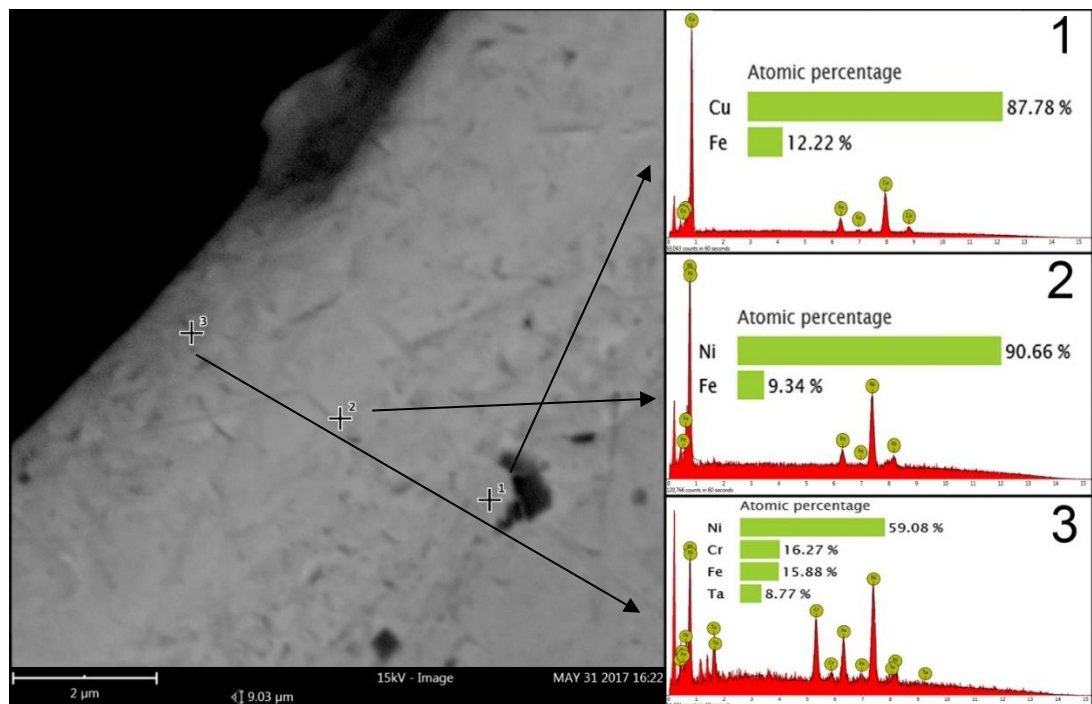


**Figura 29:** Porcentagem atômica dos elementos presentes na parte superior longitudinal do GF com magnificação de 450x.

De acordo com a Figura 29, observa-se a presença de Níquel (77,11%), Cromo (19,77%) e Ferro (3,11%) ao longo da seção longitudinal do fio. A alta presença de

Níquel e Cromo indica que o revestimento ainda permaneceu, em geral, efetivo ao longo do comprimento do fio e a pequena presença de Ferro aponta para pequenas falhas no revestimento e início de corrosão, como assinala o círculo azul na Figura 29.

O segundo local de interesse foi a parte lateral do GF. A seção transversal foi analisada conforme demonstra a Figura 30.



**Figura 30:** Porcentagem atômica dos elementos presentes na parte lateral, embutida transversalmente, do GF com magnificação de 30000x.

Os resultados obtidos para a parte lateral foram similares aos resultados obtidos na parte superior do GF.

Em 1, na base do revestimento, uma alta porcentagem atômica de Cobre (87,78%) foi encontrada e o restante (12,22%) foi Ferro, indicando uma eletrodeposição de Cobre eficiente ao substrato como primeira camada depositada.

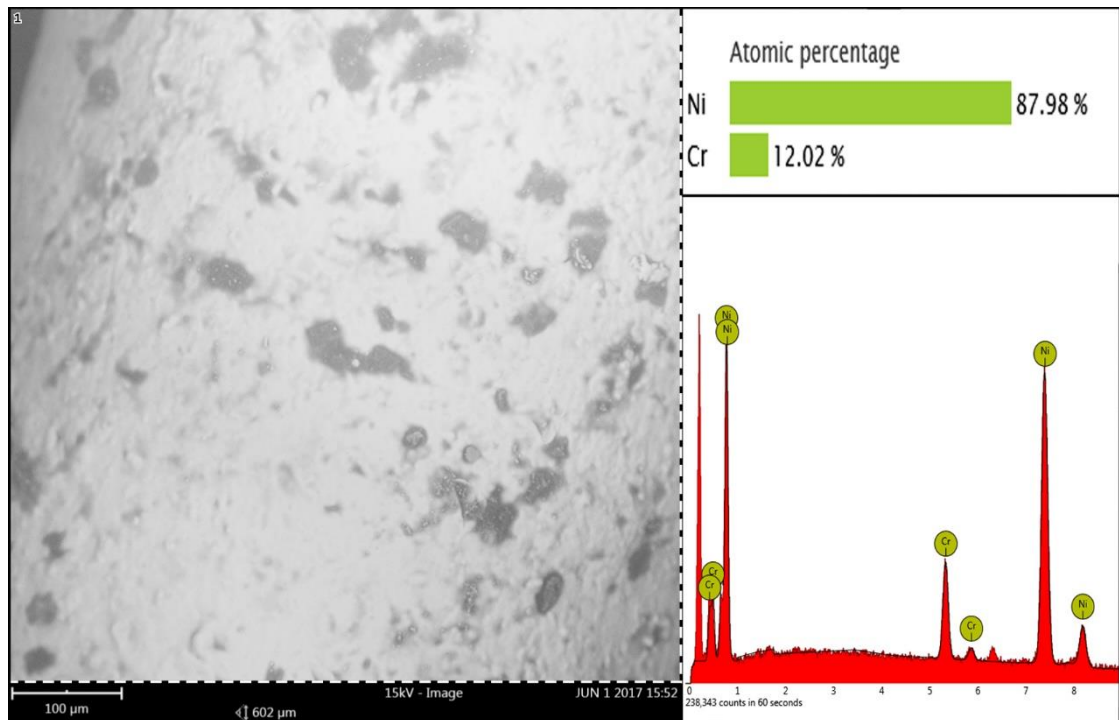
Em 2, a camada adjacente a base do revestimento apresentou uma grande proporção atômica de Níquel (90,66%) e o restante encontrado foi Ferro (9,34%). O valor encontrado para Níquel denota uma efetiva eletrodeposição de Níquel na superfície da camada de Cobre.

Em 3, a camada mais externa do revestimento apresentou alta porcentagem atômica para Cromo (16,27%) e diminuição para Níquel (de 90,66 para 59,08%) ao



comparar com o ponto 2. A presença de Tântalo apresentada não condiz com as análises por FRX ou com os possíveis elementos de liga presentes no aço, podendo ser uma falha ocorrida na análise. A grande presença de Cromo, juntamente com Níquel na camada mais externa, sugere uma boa qualidade e continuidade do revestimento.

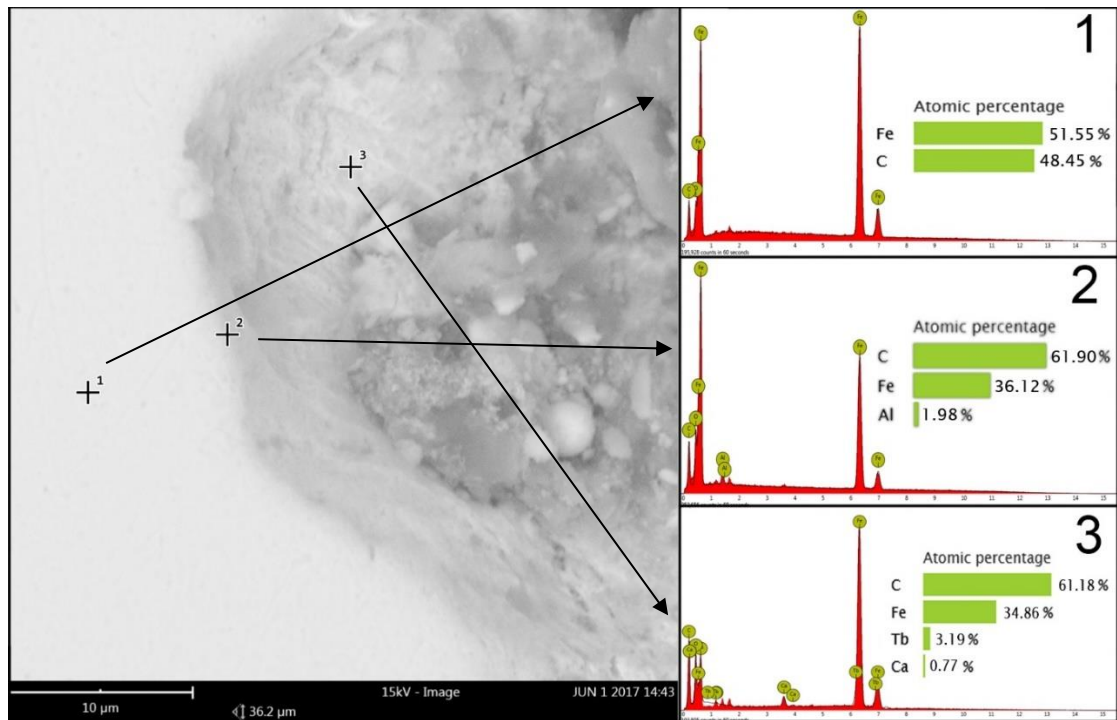
A Figura 31 revelou os resultados encontrados na seção longitudinal da parte lateral do GF.



**Figura 31:** Porcentagem atômica dos elementos presentes na parte lateral longitudinal do GF com magnificação de 450x.

De acordo com a Figura 31, observa-se a presença de Níquel (87,98%) e Cromo (12,02%) ao longo da seção longitudinal do fio. A alta presença de Níquel e Cromo indica que o revestimento ainda permaneceu efetivo ao longo do comprimento do fio, sem a presença de substrato ou pontos de descontinuidade do revestimento.

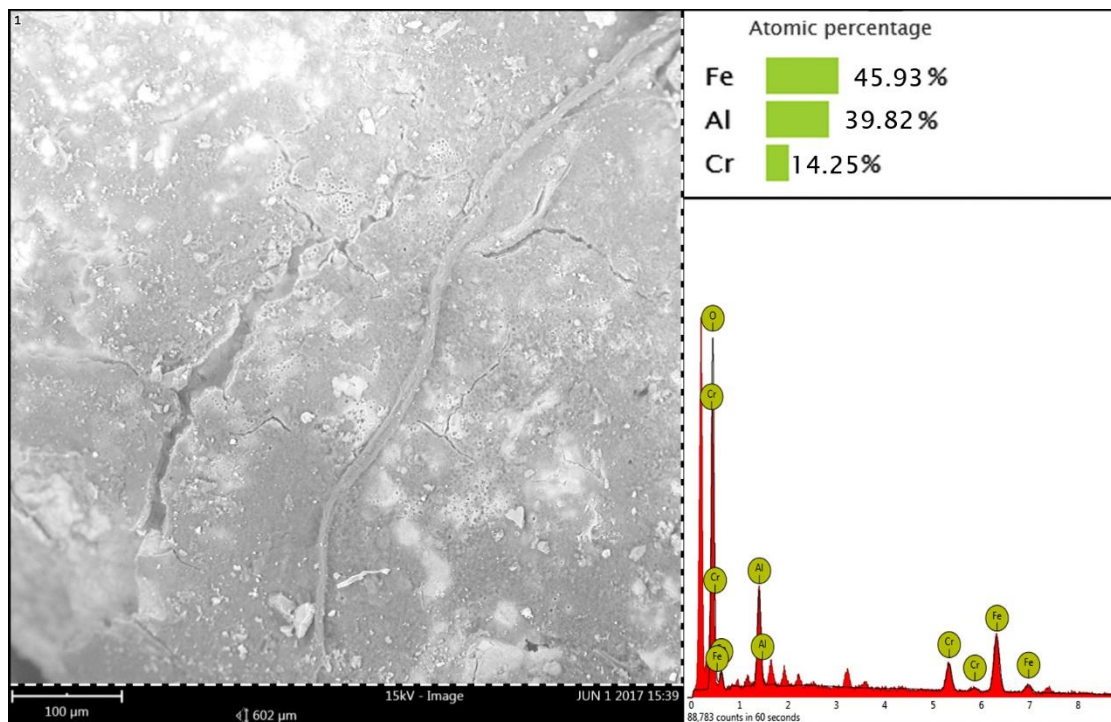
O terceiro local de interesse foi a parte superior do GO. A seção transversal foi analisada conforme demonstra a Figura 32.



**Figura 32:** Porcentagem atômica dos elementos presentes na parte superior, embutida transversalmente, do GO com magnificação de 7500x.

Não foi possível analisar camadas de revestimento na parte superior embutida do GO. A ausência total de Cobre, Níquel e Cromo não condiz com os valores de espessura encontrados por EDXRF para os três elementos. O motivo dessa ausência pode se dar pela análise por MEV e EDS de um ponto bastante atacado por corrosão, onde há a presença exclusiva de impurezas (Ponto 3; Cálcio e Térbio), substrato (Ponto 1, 2 e 3; Ferro) e possíveis elementos de liga do aço (Ponto 2; Alumínio). É possível também que tenha ocorrido erro de análise por sobreposição dos picos.

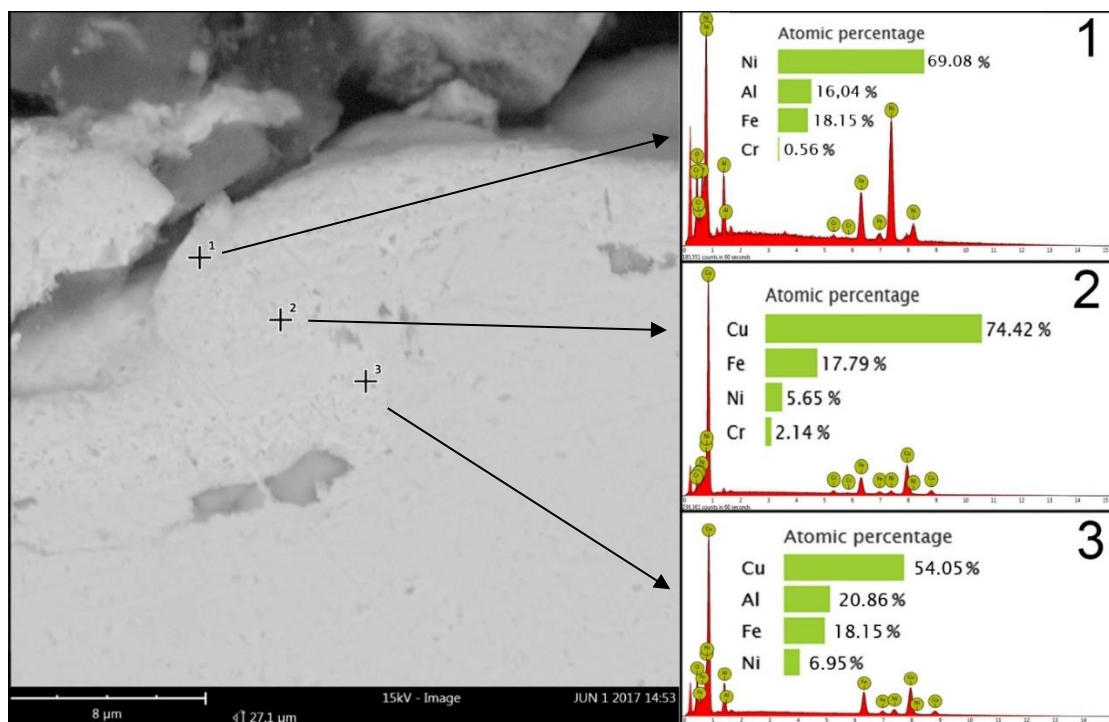
A Figura 33 revelou os resultados encontrados na seção longitudinal da parte superior do GO.



**Figura 33:** Porcentagem atômica dos elementos presentes na parte superior longitudinal do GO com magnificação de 450x.

Os valores de porcentagem atômica encontrados na seção longitudinal sugerem uma efetiva eletrodeposição de Cromo que ainda permanece depositada mesmo com a presença de uma grande área corroída nessa amostra. A alta porcentagem atômica de Alumínio pode ter sido encontrada devido a um erro de análise caracterizado pela sobreposição de picos, pois a quantidade de Alumínio encontrada foi muito alta e não condiz com os resultados encontrados por FRX.

O quarto local de interesse foi a parte lateral do GO. A seção transversal foi analisada conforme demonstra a Figura 34.



**Figura 34:** Porcentagem atômica dos elementos presentes na parte lateral, embutida transversalmente, do GO com magnificação de 10000x.

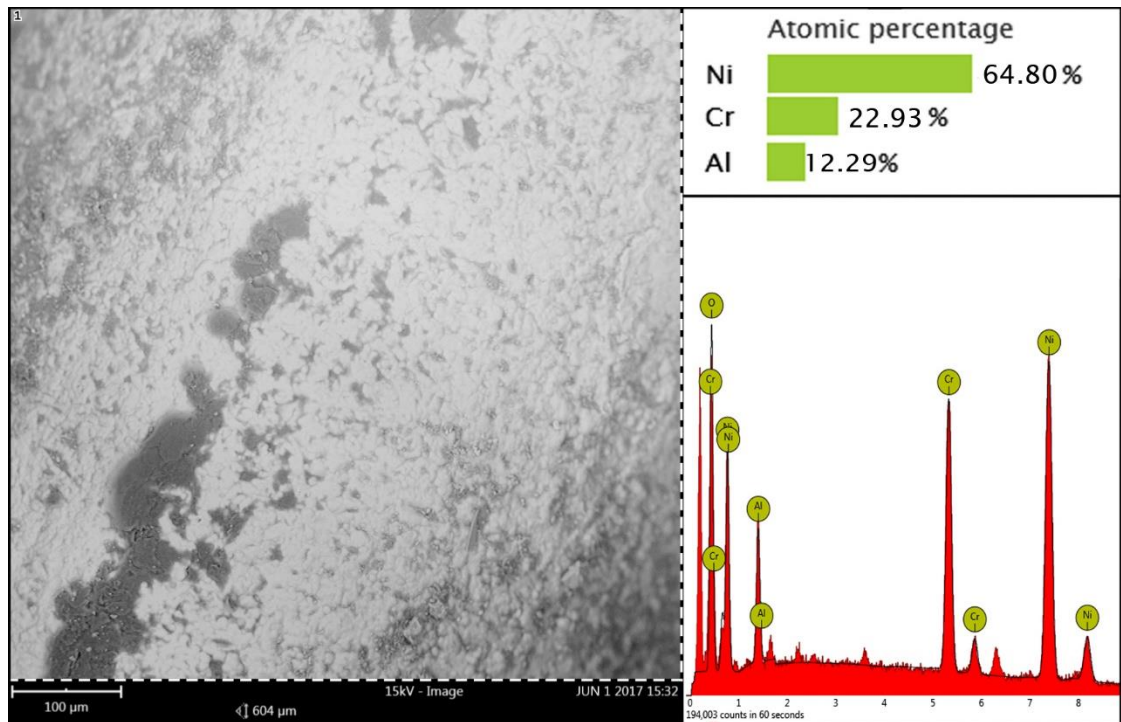
De acordo com a Figura 34, os valores de porcentagem atômica demonstrados revelam a permanência da camada revestida na parte lateral do GO.

Em 1, na camada mais externa do revestimento, existe uma alta porcentagem atômica de Níquel (69,08%) e baixa porcentagem atômica de Cromo (0,56%). A alta presença de Alumínio pode provir do erro de sobreposição dos picos, assim como na parte superior longitudinal do GO.

Em 2, surge a presença de Cobre (74,42%) e uma diminuição no percentual de Níquel (de 69,08% para 5,62%) e um aumento de percentual de Cromo (de 0,56% para 2,14%) ao comparar com o ponto 1. As variações de Cromo sugerem um revestimento menos contínuo ao longo da superfície, pois a parte mais externa do revestimento possui menor proporção de Cromo do que a interna.

Em 3, as proporções de Cobre e Níquel encontradas são similares ao ponto 2. Observou-se a ausência de Cromo e o aumento de Ferro no ponto 3, indicando maior proximidade do substrato.

A Figura 35 revelou os resultados encontrados na seção longitudinal da parte lateral do GO.



**Figura 35:** Porcentagem atômica dos elementos presentes na parte lateral longitudinal do GO com magnificação de 450x.

A Figura 35 mostra alta porcentagem atômica de Níquel (64,80%) e a presença de Cromo (22,93%) e Alumínio (12,29%).

Comparado com os elementos obtidos com a seção longitudinal superior do mesmo globo, é possível notar a ausência de Ferro na parte lateral, indicando uma melhor proteção do substrato na parte lateral. Porém, a presença de Alumínio sugere a presença de pontos corroídos e a não continuidade efetiva do revestimento ou falha por sobreposição de picos.

## 6. CONCLUSÕES

O estudo levou o autor às seguintes conclusões:

- O GO obteve deformação elástica no ensaio de compressão, sendo mais adequado no intuito de proteger a cápsula sonora do que o GF, que fraturou e suportou uma tensão menor do que o GO.
- A diferença de espessura entre os fios dos globos indicou maior tensionamento ao longo da deformação nos fios do GF, sendo esse um dos possíveis fatores para o baixo desempenho mecânico para o GF e o desempenho satisfatório do GO.
- A parte superior do GO passou por um tratamento térmico de endurecimento do aço, enquanto o GF apresentou morfologias similares na parte superior e na parte lateral, indicando uma resistência mecânica análoga a parte superior do globo, sendo esse um comportamento não ideal ao globo, uma vez que ele deve ser duro na parte superior para evitar choques mecânicos e mais tenaz na parte lateral para deformar linearmente caso for submetido a forças compressivas. Por ser um aço médio Carbono, o GO pôde passar por tratamentos térmicos que possibilitam o endurecimento do globo. Já o GF não possui Carbono suficiente para realizar tratamentos térmicos de endurecimento com efetividade.
- As diferenças microestruturais encontradas entre as partes laterais e partes superiores de cada globo sugere que os fios tramados tenham sido soldados ao anel que une as duas partes do globo (lateral e superior).
- O GO apresentou maior refino de grão ferrítico do que o GF. A partir dos tamanhos de grão, foi calculada a tensão de escoamento e verificou-se que os valores do GO foram maiores do que os valores do GF, levantando a hipótese de que o GO possa ter respondido melhor mecanicamente devido a sua microestrutura.

- Os teores de Carbono encontrados para os globos indicaram que o GO é um aço médio Carbono e é constituído de um aço mais duro que o GF, que é um aço baixo Carbono.
- O GF apresentou camadas de revestimento mais espessas e corretamente dispostas ao longo da superfície do substrato, indicando maior eficiência contra a corrosão. O GO apresentou, em geral, camadas de revestimento menos espessas e não lineares, dispostas de forma não paralelas ao longo do revestimento, dando margem ao processo corrosivo. Um possível fator para a não uniformidade do revestimento no GO pode ter sido a aplicação de uma alta densidade de corrente durante a deposição das camadas de revestimento. Também é possível que a superfície do GO não tenha sido preparada para o processo de revestimento.
- O GO apresentou bom comportamento mecânico no intuito de proteger a cápsula sonora, conferindo concordância entre o maior preço do globo ao comparar-se com o GF. Porém, ao considerar o revestimento aplicado, o GF obteve uma camada eletrodepositada de Cobre, Níquel e Cromo mais espessa e contínua, atuando mais efetivamente do que o revestimento do GO.
- Os valores encontrados nos ensaios e cálculos não podem ser utilizados como parâmetros para enquadrar os demais globos desse mesmo modelo, uma vez que existem lotes diferentes e produção em locais diferentes, alterando sua composição de acordo com a fabricação.
- No projeto do GO, as propriedades mecânicas foram priorizadas, mas sua resistência a corrosão não foi considerada corretamente. Existe a hipótese de que a empresa fabricante do GO possa usar a baixa efetividade do revestimento como um método de obsolescência programada.

## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para otimizar o processo de fabricação e de revestimento dos globos, algumas abordagens seriam relevantes:

- Levantamento de ligas resistentes a corrosão, com propriedades mecânicas adequadas e que possam ser usadas em trefilação e fabricação de globos.
- Análise, inspeção e aperfeiçoamento de camadas eletrodepositadas de revestimento ao longo do substrato.
- Desenvolvimento de técnicas para retirar a umidade presente na espuma que fica entre o globo e a cápsula sonora após sua utilização.
- Estudo de novos tipos de revestimento mais eficientes contra a corrosão e diminuição de reações alérgicas causadas principalmente pelo Níquel.



## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- <sup>1</sup> BUDHRAM, L. **Microphones: History & Development.** <[http://www.lloydmicrophoneclassics.com/mic\\_history.html](http://www.lloydmicrophoneclassics.com/mic_history.html)> Acesso em: 03 junho 2017.
- <sup>2</sup> WIKIPEDIA. **Elisha Gray and Alexander Bell telephone controversy.** <[http://en.wikipedia.org/wiki/Elisha\\_Gray\\_and\\_Alexander\\_Bell\\_telephone\\_controversy](http://en.wikipedia.org/wiki/Elisha_Gray_and_Alexander_Bell_telephone_controversy)> Acesso em: 03 junho 2017.
- <sup>3</sup> ROBJOHN, H. **A Brief History of the Microphone** <<http://microphone-data.com/media/filestore/articles/History-10.pdf>> Acesso em: 03 junho 2017.
- <sup>4</sup> EARGLE, J. **The microphone book.** Vol 2, 2005.
- <sup>5</sup> MODEL BETA 58A® USER GUIDE.
- <sup>6</sup> DESKTOP DOCUMENTARIES. **Different Types of Microphones** <<http://www.desktop-documentaries.com/different-types-of-microphones.html>> Acesso em: 08 julho 2017.
- <sup>7</sup> LEE, S.K.; KO, D.C.; KIM, B.M. **Pass schedule of wire drawing process to prevent delamination for high strength steel cord wire.** Mater Des 2009;30:2919–27.
- <sup>8</sup> SU, Y.Y.; Shemenski, R.M. **Investigation the parameters for torsion ductility of bead wire.** Mater Des 2010;31:1423–30.
- <sup>9</sup> HALL, E.O. **The deformation and ageing of mild steel: III.** Discussion of results. Proc Phys Soc B 1951;64:747–53.
- <sup>10</sup> PETCH, N.J. **The cleavage strength of polycrystals.** J Iron Steel Inst 1953;174:25–8.
- <sup>11</sup> EMBURY, J.D.; FISCHER, R.M. **The structure and properties of drawn pearlite.** Acta Metal 1966;14:147–59.

<sup>12</sup> LANGFORD, G. **A study of the deformation of patented steel wire**. Metall Mater Trans B 1970;1:465–77.

<sup>13</sup> LANGFORD, G. **Deformation of pearlite**. Metall Trans A 1977;8:861–75.

<sup>14</sup> ZHANG, X.D.; GODFREY, A.; HUANG, X.X.; HANSEN, N.; LIU, Q. **Microstructure and strengthening mechanisms in cold-drawn pearlitic steel wire**. Acta Mater 2011;59:3422–30.

<sup>15</sup> DUTRA, K. **Forjamento e Estampagem**. <<https://kaiohdutra.files.wordpress.com/2012/10/aula-4-forjamento-e-estampagem.pdf>> Acesso em: 3 maio 2017.

<sup>16</sup> HO, SJ. **The effect of a non-circular drawing sequence on spheroidization of medium carbon steel wires**, 2015.

<sup>17</sup> IOANA, M. **The Wire Drawing Process Simulation and the Optimization of Geometry Dies**, 2016.

<sup>18</sup> FILICE L.; AMBROGIO G.; GUERRIERO F. **A multi-objective approach for wire-drawing process**, Procedia CIRP 12 (2013) 294-299.

<sup>19</sup> SHEU J.J.; LIN S.Y.; CHENG-HSIEN Y. **Optimum die design for single pass steel tube drawing with large strain deformation**, Procedia Engineering 81 (2014) 688-693.

<sup>20</sup> KORCHUNOV, A.; GUN, G.; POLYAKOVA M. **Recovery effects in drawing of steel bar for sizing**. Procedia Engineering 81 (2014) 676-681.

<sup>21</sup> BORGES, M. **Trefilação** <[http://mmborges.com/processos/Conformacao/cont\\_html/trefilacao.htm](http://mmborges.com/processos/Conformacao/cont_html/trefilacao.htm)> Acesso em: 05 junho 2017.

<sup>22</sup> COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. Ed. Edgard Blucher, São Paulo, 1974.

<sup>23</sup> CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros fundidos**. 6ª Edição. Publicação da Associação Brasileira de Metais. São Paulo, 1988.

<sup>24</sup> **Ferros & aços:** Alguns conceitos básicos. <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAhPngAL/Ferro-aco-conceitos#>> Acesso em: 11 maio 2017.

<sup>25</sup> COSTA E SILVA, A. E.; MEI, P.R. **Aços e ligas especiais**. Vol.2,2006.

<sup>26</sup> HONEYCOMB, R.W.K.; BHADESHIA, H.K.D.H. **Steels**. London, 1995.

<sup>27</sup> SHIBATA, A.; MORITO, S.; FURUHARA, T.; MAKI, T. **Morphology and crystallography of martensite in Ferrous alloys**, 2005.

<sup>28</sup> CALLISTER, W. D. J. **Ciência e engenharia de materiais:** uma introdução. 7a ed.Utah: John Wiley & Sons, 2008.

<sup>29</sup> **Transformações difusionais.**  
<[http://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/6439-transformacoes#.WV\\_VOYgrLIU](http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6439-transformacoes#.WV_VOYgrLIU)> Acesso em: 26 maio 2017.

<sup>30</sup> WURZBACH, R. N.; De FELICE, W. **Improving component wear performance through cryogenic treatment.** <<http://www.cryoplus.com/pdf/icwptct.pdf>>. Acesso em: 15 junho 2017.

<sup>31</sup> TAMURA, I. et al. **Thermomechanical Processing of High Strength Low Alloy Steels**. 1ª. ed. London: Butterworths, 1988.

<sup>32</sup> HALL, E.O. **The Deformation and Ageing of Mild Steel:** III Discussion of Results. Proceedings of the Physical Society. Section B, Volume 64, Number 9, 1951.

<sup>33</sup> KUNITAKE, T. **On the Yield Strength of Quenched and Tempered Structures of Low-Carbon, Low Alloy Steels.** Transaction of the Iron and Steel Institute of Japan, n.7, p.254-262, 1967.

<sup>34</sup> MORRISON, B. W. **Overview of Microalloying in Steel.** The Proceedings of the Vanitec Symposium, Guilin, 2000.

<sup>35</sup> GENTIL, V. **Corrosão**. 3 ed. São Paulo: LTC, 1996. 210p.

<sup>36</sup> **Aços inoxidáveis.**  
<[http://www.pipesystem.com.br/Artigos\\_Tecnicos/Aco\\_Inox/body\\_aco\\_inox.html](http://www.pipesystem.com.br/Artigos_Tecnicos/Aco_Inox/body_aco_inox.html)>  
Acesso em: 18 junho 2017.

- <sup>37</sup> GEMELLI, E. **Corrosão de Materiais Metálicos e sua Caracterização**. LTC – Livros Técnicos Científicos, Rio de Janeiro, 2001.
- <sup>38</sup> PANOSSIAN, Z. **Corrosão e proteção contra corrosão em equipamentos e estruturas metálicas**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, 1993.
- <sup>39</sup> BUZZONI, H. A. **Galvanoplastia**. São Paulo: Ícone, 1988. 68 p. 2.
- <sup>40</sup> ENGELBERG, J. **Noções fundamentais de galvanotécnica**. São Paulo: Orientador, 1967.
- <sup>41</sup> ARAÚJO, N. V. S. **Galvanoplastia com Cromo: diagnóstico das condições ambientais e ocupacionais em pequenas empresas**. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.
- <sup>42</sup> LAUSMANN, G.A. **Chromium Plating**. Stuttgart, 2006. 348p.
- <sup>43</sup> PASQUALINI, A. **Estudo de Caso Aplicado a Galvanoplastia**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC. Florianópolis, 2004.
- <sup>44</sup> REIS, L. G. **Tecnologia aplicada a processos galvânicos**. São Paulo: Ed. SENAI-SP, 2015. 324 p.
- <sup>45</sup> BURGESS, W. A. **Identificação de Possíveis Riscos à Saúde do Trabalhador nos Diversos Processos Industriais**. Belo Horizonte: Ergo Editora, 1997.
- <sup>46</sup> TEIXEIRA, I. O.; BARBOSA, A. H. A. **Estudo dos Parâmetros e das Técnicas de Medição de Rugosidade em Produtos Laminados a Frio**. Relatório final de estudo de P&D – RPPQ4436, 2004.
- <sup>47</sup> TEIXEIRA, I. O.; BARBOSA, A. H. A.; SANTOS, A. A.; ZACARIAS, J. J. **Análise da Influência dos Parâmetros Operacionais de Eletro galvanização na Rugosidade e no “Waviness”**. Relatório final de estudo de P&D – RPPR4410, 2006.
- <sup>48</sup> ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4287. Termos, Definições e Parâmetros de Rugosidade, Especificações Geométricas do produto (GPS) – Rugosidade – Método do Perfil**. 18p., 2002.

- <sup>49</sup> AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM B 117**: Standard Method of Salt Spray (FOG). ASTM Standards, 1973.
- <sup>50</sup> AMORIM, H.J. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- <sup>51</sup> MACHADO, A. R.; SILVA, M. B.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A. M. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Blücher, 2009.
- <sup>52</sup> GABRIELSON, G. **Complex ions in chromium plating solution**. Metal Finishing, v.53, n.5, p. 56-58, 1955.
- <sup>53</sup> **Eletr deposição do Cobre** <<https://prezi.com/-6gfjmwujj0g/eletr deposicao-do-Cobre/>> Escola de Engenharia de Lorena – USP. Acesso em: 20 junho 2017.
- <sup>54</sup> FODES, P. A. **Galvanotécnica Prática**. São Paulo: Polígono; USP, 1973.
- <sup>55</sup> SCHLESINGER M. **Modern Electroplating**.5 ed, 2014.
- <sup>56</sup> SCHARIO, M. **Troubleshooting decorative nickel plating solutions (Part I of III installments)**: any experimentation involving nickel concentration must take into account several variables, namely the temperature, agitation, and the nickel-chloride mix, Met. Finish. 105 (44) (2007) 34–36.
- <sup>57</sup> SEOK, M. Y.; CHOI, I.C.; MOON, J.; KIM, S.; RAMAMURTYD, U.; JANGA, J.I. **Estimation of the Hall–Petch strengthening coefficient of steels through nanoindentation**, 2014.
- <sup>58</sup> **AISI-SAE CLASSIFICATIONS OF STEELS**: Base Metals Code Designations and Filler Metal Classifications as per AISI, SAE, ASME and CSA.
- <sup>59</sup> ASM METALS HANDBOOK. **Metallography And Microstruct**. Vol. 09, 1992.