

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPMec**

**LUCIANO MACHADO SILVEIRA**

**AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE UM CABO CONDUTOR ELÉTRICO DE  
ALUMÍNIO LIGA 6201, SUBMETIDO À AÇÃO DE AMBIENTE MARÍTIMO,  
NO LITORAL DE RIO GRANDE-RS**

**RIO GRANDE**

**2019**

**LUCIANO MACHADO SILVEIRA**

**AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE UM CABO CONDUTOR ELÉTRICO DE  
ALUMÍNIO LIGA 6201, SUBMETIDO À AÇÃO DE AMBIENTE MARÍTIMO,  
NO LITORAL DE RIO GRANDE-RS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Volcanoglo Biehl

Co-orientador: Prof. Dr. José de Souza

**Rio Grande**

**2019**

### Ficha catalográfica

S587a    Silveira, Luciano Machado.  
Avaliação da degradação de um cabo condutor elétrico de alumínio liga 6201, submetido à ação de ambiente marítimo, no litoral de Rio Grande-RS / Luciano Machado Silveira. – 2019.  
109 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rio Grande/RS, 2019.  
Orientador: Dr. Luciano Volcanoglo Biehl.  
Coorientador: Dr. José de Souza.

1. Cabos Condutores 2. Alumínio Liga 6201 3. Degradação Metálica 4. Corrosão Atmosférica I. Biehl, Luciano Volcanoglo II. Souza, José de III. Título.

CDU 621.315:669.71(816.5)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**  
**PPMec**



Ata nº 15/2019 da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos Vinte dias do mês de agosto de dois mil e dezenove foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às nove horas e na Sala de Aula PPMec, no Campus Carreiros desta Universidade, a que se submeteu a **LUCIANO MACHADO SILVEIRA**, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a Linha de Pesquisa Engenharia de Soldagem e Materiais do PPMec, com o seguinte título: **Avaliação da Degradação de um Cabo Condutor Elétrico de Alumínio Liga 6201, Submetido à Ação de Ambiente Marítimo, no Litoral de Rio Grande-RS**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Jorge Luis Braz Medeiros e José de Souza, sob a presidência do Professor Luciano Volcanoglo Biehl. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Luciano Volcanoglo Biehl: APROVADO
2. Jorge Luis Braz Medeiros: APROVADO
3. José de Souza: APROVADO

Foi concedido um prazo de 30 dias para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

1. Luciano Volcanoglo Biehl  
CPF: 575.195.100-00
2. Jorge Luis Braz Medeiros  
CPF: 588.871.210-87
3. José de Souza  
CPF: 914.626.140-00

Luciano Machado Silveira: \_\_\_\_\_



*À minha esposa Juliana Latorres*

*Ao meu filho Miguel*

*À minha mãe Lorena*

*À memória de meu pai Paulo Roberto*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, por me dar forças, me trazer lucidez e permitir chegar até esse momento em condições de atingir mais essa conquista.

Ao meu pai Paulo Roberto, *in memoriam*, pela educação, por me passar valores na vida, por ter me ensinado a perseguir os meus sonhos e ter sido meu melhor amigo enquanto estivemos juntos nesse plano.

À minha mãe Lorena, que mesmo à distância sempre me ensinou a ter força, garra e a não desanimar nos momentos mais adversos.

À minha esposa Juliana, por ter formado comigo a linda família que temos, pela paciência, pela compreensão, por ter me trazido paz e tranquilidade na reta final deste trabalho, mesmo quando enfrentávamos um momento de travessia por tantas adversidades, por me fazer acreditar, mesmo quando eu achava que já não iria mais conseguir.

Ao meu filho Miguel, que veio ao mundo durante o curso deste trabalho, por ter dado razão à minha vida, e que, por ser tão pequenino, ainda não tem a compreensão de tudo que ele significa para mim. A conclusão deste trabalho também foi por ele.

Ao amigo, orientador e mestre, Professor Dr. Luciano Volcanoglo Biehl, por ter me recebido no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da FURG, por ter aceitado a missão de me orientar, por ter aceitado o tema sugerido, pelas palavras de incentivo, por ter sido decisivo na reta final do trabalho com toda sua experiência e sabedoria.

Ao amigo e meu outro mestre, Professor Dr. Jorge Luiz Braz Medeiros, por ter me incentivado nos primeiros passos dentro dos laboratórios, por toda sua experiência e direcionamento do trabalho desde o início dos ensaios, por todo o apoio recebido, o meu agradecimento especial.

Ao meu co-orientador, Professor Dr. José de Souza, pela paciência e pela competência com que direcionou as oportunidades de melhoria no trabalho, enriquecendo o texto final, valorizando ainda mais todo esforço que foi chegar até aqui.

Ao amigo e Professor Márcio Ulguim Oliveira, pelo direcionamento dado no momento de indecisão quanto à composição do ataque químico a ser feito nas amostras.

Ao técnico da Escola de Engenharia da FURG, Jorge Airton Badin de Oliveira por ter sido decisivo no apoio dado à preparação das minhas amostras e realização dos ensaios de microscopia ótica.

Ao bolsista Miguel de Tunes Fehrenbach e mestrando Hektor Borges pelo apoio na preparação das amostras, realização dos ensaios e indicação de material para pesquisa.

Aos técnicos do CEME-Sul da FURG, Rudimar Krumreick e Caroline Pires Ruas, pela forma com que me receberam e pelo apoio dado para a realização dos ensaios de DRX e MEV/EDS.

Aos amigos Julio Rosca e Rodrigo Lopes, colegas na empresa e no mestrado, que estiveram juntos comigo nessa caminhada, dividindo angústias e preocupações, seja com os rumos de nossa tão amada empresa e eventual recolocação profissional, seja com os resultados obtidos por cada um na sua pesquisa, e que me incentivaram para que eu chegasse até o fim dessa missão.

A empresa em que trabalho, Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica CEEE D, patrimônio do povo gaúcho, empresa que forjou o profissional que sou hoje, nesses 20 anos de trajetória e que serviu de inspiração e motivação para realização deste trabalho, onde a partir de uma situação prática enfrentada no ambiente de trabalho, surgiu a possibilidade de desenvolver a presente pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, pela oportunidade.

*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor,  
Mas lutei para que o melhor fosse feito.  
Não sou o que deveria ser,  
Mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.*  
*(Marthin Luther King)*

*Se você encontrar um caminho sem obstáculos,  
ele provavelmente não leva a lugar nenhum.*  
*(Frank A. Clark)*

## RESUMO

A regulamentação do setor elétrico nacional tem limitado cada vez mais as concessionárias de distribuição de energia elétrica quanto à frequência e duração das interrupções no fornecimento de energia elétrica ao consumidor final, prevendo inclusive penalidades financeiras às empresas que não atendem as metas regulatórias. Um dos maiores desafios das empresas que atuam nesse segmento é manter a continuidade do sistema, desenvolvendo soluções que minimizem os impactos de ações de furto e vandalismo, na operação do sistema com toda a sua complexidade e desempenho das redes e dos materiais que as compõem, mesmo em atmosferas desafiadoras como a existente no município de Rio Grande, localizado junto ao litoral sul do Rio Grande do Sul, região característica pela proximidade com o Oceano Atlântico, portanto sob ação da maresia, além das influências causadas pelas indústrias de fertilizantes e refinaria de petróleo, instaladas em seu distrito industrial. Nesse sentido, o presente trabalho avaliou o desempenho de um condutor elétrico de alumínio Liga 6201, recém padronizado pela CEEE Distribuição, companhia de energia que atua na região, após 17.550 horas de exposição nessa atmosfera, utilizado na alimentação elétrica de um empreendimento comercial que se instalou na região. Foi um projeto pioneiro na área de concessão da Companhia, fato que motivou a investigação de seu comportamento sob as condições apresentadas. Historicamente, a empresa utilizava condutores de cobre nas regiões próximas à orla marítima, no entanto, devido às frequentes ações de furto e vandalismo na região, foi utilizado este material de forma experimental. Após 17.550 horas de operação contínua, pouco mais de 2 anos, foram retiradas amostras do condutor com distâncias de 650, 1.550, 3.270 e 4.720 m em relação à costa, as quais foram comparadas entre si e com outra amostra de mesmo material, porém em seu estado novo, sem utilização. Foram realizados ensaios de Microdureza Vickers, onde foi constatado que a amostra mais próxima à costa apresentou redução de 14% na dureza quando comparado ao material novo, porém com valor médio dentro do estabelecido por norma. Posteriormente foram obtidas imagens em microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura, além da análise por espectroscopia de energia dispersiva (EDS), onde se pôde observar uma maior concentração de magnésio nos contornos de grão da amostra mais próxima a costa. As amostras também foram avaliadas através do ensaio de difratometria de raios X, onde se observou resultados muito semelhantes quando comparadas as amostras do cabo sem uso com o cabo instalado mais próximo à costa, com o surgimento de um pequeno pico, que poderia estar relacionado à formação de uma segunda fase, mas devido à sua pequena intensidade o resultado não pode ser considerado conclusivo. A partir dos resultados obtidos, verificou-se que quanto mais próximo à costa, maior foi a perda de resistência mecânica, no entanto, para a amostra retirada a 4.720 m da costa essa variação na resistência já não pôde mais ser percebida. Também não foram verificadas alterações microestruturais nem formação de intermetálicos devido ao efeito do envelhecimento natural, de maneira que é possível concluir que o tempo de exposição a esse ambiente por pouco mais de 2 anos não foi significativo sob o ponto de vista da degradação do material, atestando que o mesmo possui condições de prosseguir em operação nas mesmas condições em que esse encontra instalado.

**Palavras-chave:** Cabos condutores, alumínio liga 6201, degradação metálica, corrosão atmosférica

## ABSTRACT

The regulation of the national electric sector has increasingly limited electricity distribution concessionaires as to the frequency and duration of interruptions in the supply of electricity to the end consumer, including financial penalties for companies that do not meet the regulatory goals. One of the biggest challenges for companies operating in this segment is to maintain system continuity, developing solutions that minimize the impacts of theft and vandalism, system operation with all its complexity and performance of the networks and their materials, even in challenging atmospheres like the one in Rio Grande, located near the south coast of Rio Grande do Sul, a region characterized by its proximity to the Atlantic Ocean, therefore under the action of the sea, besides the influences caused by the fertilizer and oil refinery industries, installed in your industrial district. In this sense, the present work evaluated the performance of a conductor aluminum alloy 6201, recently standardized by CEEE Distribution, an energy company operating in the region, after 17.550 hours of exposure in this atmosphere, used to power a commercial venture installed in the region. It was a pioneer project in the Company's concession area, which motivated the investigation of its behavior under the conditions presented. Historically, the company used copper conductors in the regions near the seafront, however, due to frequent theft and vandalism in the region, this material was used experimentally. After 17.550 hours of continuous operation, just over 2 years, conductor samples were taken at distances of 650, 1.550, 3.270 and 4.720 meters from the coast, which were compared with each other and with another sample of the same material, but in its new state, unused. Vickers microhardness tests were performed, where it was found that the sample closer to the coast showed a 14% reduction in hardness when compared to the new material, but with an average value within the Norm. Subsequently, optical microscopy and scanning electron microscopy images were obtained, as well as dispersive energy spectroscopy (EDS) analysis, where a higher concentration of magnesium was observed in the grain contours of the sample closer to the coast. The samples were also evaluated by the X-ray diffraction test, where very similar results were observed when comparing the unused cable samples with the cable installed closer to the coast, with the appearance of a small peak, which could be related to formation of a second phase, but due to its low intensity the result cannot be considered conclusive. From the results obtained, it was found that the closer to the coast, the greater the loss of mechanical resistance, however, for the sample taken at 4.720 meters from the coast this variation in resistance could no longer be noticed. Neither microstructural changes nor intermetallic formation were observed due to the effect of natural aging, so it can be concluded that the exposure time to this environment for a little over 2 years was not significant from the point of view of material degradation, certifying that it has conditions to continue operating under the same conditions in which it is installed.

**Key words:** Conductive cables, aluminum alloy 6201, metallic degradation, atmospheric corrosion

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Reações Anódicas Principais .....	23
Figura 2 – Reações Catódicas Principais .....	25
Figura 3 – Mapa Climático do Brasil. ....	29
Figura 4 – Efeito da Distância da Fonte sobre a Velocidade de Corrosão. ....	33
Figura 5 – Esquema de uma Célula de Corrosão com Íons Sulfato sobre o Aço. ....	33
Figura 6 – Processo Autocatalítico que ocorre na Corrosão Localizada (Pits). ....	35
Figura 7 – Produtos de Corrosão de um Pit. ....	36
Figura 8 – Índice de Potencial Poluidor da Indústria, por Município. ....	38
Figura 9 – Séries das ligas alumínio com seus principais elementos de liga mostrando as tratáveis e as não tratáveis termicamente. ....	40
Figura 10 (a) (b) – Comparação da estrutura da liga antes e após a homogeneização .....	44
Figura 11 – Diagrama de uma liga que pode ser solubilizada.....	46
Figura 12 – Solubilização (a) matéria prima (b) aquecimento (c) resfriamento rápido .....	47
Figura 13 – Influência do tempo de envelhecimento sobre a dureza .....	49
Figura 14 – Evolução da forma dos precipitados x tempo (curva de envelhecimento).....	50
Figura 15 – Diagrama de fases em equilíbrio de uma liga Al-Mg-Si .....	51
Figura 16 – Imagens de MEV (elétrons retroespalhados) evidenciando a morfologia das fases intermetálicas de uma liga AL-3%Mg-1%Si para diferentes distâncias até o molde (15 e 90 mm) .....	53
Figura 17 – Diagrama ternário de ligas Al-Mg-Si (a) e ampliação (b) do canto inferior direito com concentrações da liga AA6201. ....	55
Figura 18 – Diagrama de fases da liga destacando a temperatura <i>liquidus</i> .....	56
Figura 19 – Diâmetro nominal (dn) de um cabo com 3 camadas (37 fios).....	58
Figura 20 – Fluxograma de desenvolvimento dos ensaios.....	64
Figura 21 – Mapa da região de estudo com indicação dos pontos de coleta das amostras .....	65
Figura 22 – Representação do Ponto 1, com raio de 650m em relação à costa.....	68
Figura 23 – Representação do Ponto 2, com raio de 1.550 m em relação à costa.....	69
Figura 24 – Representação do Ponto 3, com raio de 3.270 m em relação à costa.....	69
Figura 25 – Representação do Ponto 4, com raio de 4.720 m em relação à costa.....	70
Figura 26 – Amostras dos cabos embutidas .....	71
Figura 27 – Imagens de microscopia ótica, a) cabo novo, b) 650m da costa, c) 1.550 m da costa, d) 3.270 m da costa, e) 4.720 m da costa .....	75
Figura 28 – Curvas com ensaio de microdureza Vickers para a amostra de cabo novo .....	76
Figura 29 – Curvas com ensaio de microdureza Vickers para amostra à 650 m da costa.....	77
Figura 30 – Curvas com ensaio de microdureza Vickers para amostra à 1.550 m da costa.....	78
Figura 31 – Curvas com ensaio de microdureza Vickers para amostra a 3.270 m da costa.....	78
Figura 32 – Curvas com ensaio de microdureza Vickers para amostra a 4.720 m da costa.....	79
Figura 33 – Curvas com ensaio de microdureza Vickers para todas as amostras da liga .....	80
Figura 34 – Dureza média de cada amostra da liga AL 6201 .....	80
Figura 35 – MeV da Amostra de cabo novo, sem uso .....	81
Figura 36 – Formação da imagem através dos filtros dos elementos da amostra sem uso .....	82
Figura 37 – MeV da Amostra a 650 m da costa.....	83
Figura 38 – Formação da imagem através dos filtros dos elementos da Amostra à 650 metros da costa.....	84
Figura 39 – Difratograma da amostra de cabo novo.....	86
Figura 40 – Difratograma da amostra a 650 m da costa .....	86

Figura 41 – Imagem da amostra de cabo novo, ampliada 50x .....	95
Figura 42 – Imagem da amostra de cabo novo, ampliada 100x .....	95
Figura 43 – Imagem da amostra de cabo novo, ampliada 200x .....	96
Figura 44 – Imagem da amostra de cabo novo, ampliada 1000x .....	96
Figura 45 – Imagem da amostra a 650 m da costa, ampliada 50x.....	97
Figura 46 – Imagem da amostra a 650 m da costa, ampliada 100x.....	97
Figura 47 – Imagem da amostra a 650 m da costa, ampliada 200x.....	98
Figura 48 – Imagem da amostra a 650 m da costa, ampliada 1000x.....	98
Figura 49 – Imagem da amostra a 1.550 m da costa, ampliada 50x.....	99
Figura 50 – Imagem da amostra a 1.550 m da costa, ampliada 100x.....	99
Figura 51 – Imagem da amostra a 1.550 m da costa, ampliada 200x.....	100
Figura 52 – Imagem da amostra a 1.550 m da costa, ampliada 1000x.....	100
Figura 53 – Imagem da amostra a 3.270 m da costa, ampliada 50x.....	101
Figura 54 – Imagem da amostra a 3.270 m da costa, ampliada 100x.....	101
Figura 55 – Imagem da amostra a 3.270 m da costa, ampliada 200x.....	102
Figura 56 – Imagem da amostra a 3.270 m da costa, ampliada 1000x.....	102
Figura 57 – Imagem da amostra a 4.720 m da costa, ampliada 50x.....	103
Figura 58 – Imagem da amostra a 4.720 m da costa, ampliada 100x.....	103
Figura 59 – Imagem da amostra a 4.720 m da costa, ampliada 200x.....	104
Figura 60 – Imagem da amostra a 4.720 m da costa, ampliada 1000x.....	104
Figura 61 – MeV da amostra a 1.550 m da costa .....	105
Figura 62 – Formação da imagem através dos filtros dos elementos amostra a 1.550 m .....	105
Figura 63 – MeV da amostra a 3.270 m da costa .....	106
Figura 64 – Formação da imagem através dos filtros dos elementos amostra a 3.270 m .....	106
Figura 65 – MeV da amostra a 4.720 m da costa .....	107
Figura 66 – Formação da imagem através dos filtros dos elementos amostra a 4.720 m .....	107
Figura 67 – Difratoograma da amostra a 1.550 m da costa .....	108
Figura 68 – Difratoograma da amostra a 3.270 m da costa .....	108
Figura 69 – Difratoograma da amostra a 4.720 m da costa .....	109
Figura 70 – Difratoograma de todas as amostras da liga AL 6201 .....	109



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação Climática de Köppen adaptada ao Brasil. ....	30
Tabela 2 – Família de ligas de alumínio, seus principais elementos de liga e aplicações gerais.....	41
Tabela 3 – Faixa química para as ligas 6101 e 6201 USA, (porcentagem em peso). ....	54
Tabela 4 – Composição da liga de alumínio 6201.....	54
Tabela 5 – Economia de energia condutores ACSR versus AAAC.....	62
Tabela 6 – Coordenadas Geográficas dos pontos estudados .....	68
Tabela 7 – Composição química Alumínio ASTM.....	70

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

<b>A.A.</b>	The Aluminum Association
<b>AAAC</b>	All-Aluminium Alloy Conductor
<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>ACSR</b>	Aluminium Conductor Steel Reinforced
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Óxido de Alumínio
<b>ANEEL</b>	Agência Nacional de Energia Elétrica
<b>AWG</b>	American Wire Gage
<b>CA</b>	Cabo de alumínio nu
<b>CAA</b>	Cabo de alumínio nu com alma de aço
<b>CAL</b>	Cabos de liga de alumínio
<b>CALA</b>	Cabos de alumínio com alma de liga de alumínio
<b>CEEE Distribuição</b>	Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica
<b>CEME SUL</b>	Centro de Microscopia Eletrônica da Região Sul
<b>CFC</b>	Cúbica de Face Centrada
<b>CFC</b>	Cúbica de face centrada
<b>CM</b>	Circular Mil
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de Carbono
<b>DRX</b>	Difratômetro de Raios X
<b>EDS</b>	Espectroscopia de Energia Dispersiva
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Óxido de Ferro
<b>Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub></b>	Óxido de Ferro Magnético
<b>FeCO<sub>3</sub></b>	Carbonato de Ferro
<b>FEE</b>	Fundação de Economia e Estatística
<b>FEPA</b>	Federação Europeia de Fabricantes de Produtos Abrasivos
<b>FeS</b>	Sulfeto de Ferro

<b>GP</b>	Guinier e Preston
<b>H<sub>2</sub>S</b>	Sulfeto de Hidrogênio
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	Ácido Sulfúrico
<b>HV</b>	Hardness Vickers
<b>IACS</b>	International Annealed Copper Standard
<b>IADS</b>	International Alloy Designation System
<b>MEV</b>	Microscópio Eletrônico de Varredura
<b>Mg<sub>2</sub>Si</b>	Silicato de Magnésio
<b>MME</b>	Ministério de Minas e Energia
<b>MWh</b>	Megawatt hora
<b>NaCl</b>	Cloreto de Sódio
<b>NH<sub>3</sub></b>	Amônia
<b>NiFe</b>	Liga Níquel-Ferro
<b>NO<sub>x</sub></b>	Óxidos de Nitrogênio
<b>O<sub>3</sub></b>	Ozônio
<b>PRODIST</b>	Procedimentos de Distribuição
<b>SED</b>	Sistema Elétrico de Distribuição
<b>SO<sub>2</sub></b>	Dióxido de Enxofre
<b>SO<sub>3</sub></b>	Trióxido de Enxofre
<b>SO<sub>x</sub></b>	Óxidos de Enxofre
<b>UR</b>	Umidade Relativa
<b>UV</b>	Ultravioleta

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>2. JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>20</b>
<b>3. OBJETIVOS .....</b>	<b>20</b>
3.1. OBJETIVOS GERAIS .....	20
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	20
<b>4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>22</b>
4.1. INTRODUÇÃO À CORROSÃO.....	22
4.1.1. O Ânodo .....	23
4.1.2. O Cátodo .....	24
4.1.3. O Eletrólito .....	25
4.1.4. O Circuito Externo .....	26
4.1.5. Conceito Químico De Uma Célula De Corrosão .....	26
4.1.6. Conceito Elétrico De Uma Célula De Corrosão.....	26
4.2. CORROSÃO ATMOSFÉRICA .....	27
4.2.1. Umidade .....	27
4.2.2. Temperatura .....	30
4.2.3. Radiação.....	31
4.2.4. Chuvas e Ventos.....	31
4.2.5. Gases .....	32
4.2.5.1. Oxigênio .....	32
4.2.5.2. Dióxido de Enxofre.....	32
4.2.5.3. Sulfeto de hidrogênio.....	33
4.2.6. Cloretos .....	34
4.2.7. Partículas Sedimentáveis.....	36
4.3. TIPOS DE ATMOSFERA .....	36
4.4. O ALUMÍNIO .....	38
4.4.1. Ligas de Alumínio.....	39
4.4.2. Tratamentos Térmicos Aplicados nas Ligas de Alumínio .....	43
4.4.2.1. Têmperas.....	43
4.4.2.2. Homogeneização.....	44
4.4.2.3. Recozimento .....	44
4.4.2.4. Alívio de Tensões .....	45
4.4.2.5. Solubilização.....	45
4.4.2.6. Envelhecimento .....	48
4.4.3. Ligas Al-Mg-Si .....	50
4.4.4. Ligas de Alumínio 6201 .....	53
4.5. CONDUTORES.....	57
4.5.1. Padronização de Dimensões de Fios e Cabos .....	57
4.5.2. Tipos de Cabos Condutores de Redes Aéreas .....	58
4.5.3. O Uso da Liga 6201 na Fabricação de Cabos Condutores .....	60
4.5.4. Vantagens De Cabos Condutores Com Liga 6201.....	61
<b>5. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>63</b>
5.1. REGIÃO DE ESTUDO .....	65

5.2.	MATERIAL DE ESTUDO.....	66
5.3.	MICROSCOPIA ÓTICA .....	71
5.4.	MICRODUREZA VICKERS.....	72
5.5.	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA E ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA.....	72
5.6.	DIFRATÔMETRO DE RAIO X .....	73
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>74</b>
6.1.	MICROSCOPIA ÓTICA .....	74
6.2.	MICRODUREZA VICKERS.....	76
6.3.	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA/ ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA.....	81
6.4.	DIFRATOMETRIA DE RAIOS X .....	85
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>88</b>
<b>8.</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>89</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>90</b>
<b>9.</b>	<b>APÊNDICE .....</b>	<b>95</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O consumo de energia é um dos principais indicadores do desenvolvimento econômico e do nível de qualidade de vida de qualquer sociedade. Ele reflete tanto o ritmo de atividade dos setores industrial, comercial e de serviços, quanto a capacidade da população para adquirir bens e serviços tecnologicamente mais avançados, como automóveis (que demandam combustíveis), eletrodomésticos e eletroeletrônicos (que exigem acesso à rede elétrica e pressionam o consumo de energia elétrica). Essa inter-relação foi o principal motivo do acentuado crescimento no consumo mundial de energia verificado nos últimos anos [1].

Por consequência, tornam-se necessários investimentos permanentes no sistema, de forma a garantir a confiabilidade no fornecimento bem como o atendimento à demanda crescente. No entanto, a necessidade destes investimentos não se limita apenas à geração de energia, através de usinas e parques geradores. É necessário assegurar também a continuidade do sistema elétrico para que a energia gerada seja transmitida aos centros de consumo e devidamente distribuída aos consumidores finais. Nesse sentido, as linhas de transmissão e distribuição de energia possuem esse papel, e integram o sistema elétrico de potência.

Atentas a essa necessidade, as concessionárias de energia elétrica atuam na implementação de métodos para redução de custos e perdas técnicas através da realização de obras, com custos cada vez menores, buscando valores competitivos, respeitando critérios mínimos de dimensionamento previstos em normativas.

Em uma rede elétrica, o principal elemento é o condutor, o qual influencia vários outros aspectos do projeto, tais como estruturas, fundações, isoladores, ancoragens, entre outros.

Deste modo, o setor elétrico brasileiro, assim como em muitas partes do mundo, tem sofrido transformações nos últimos anos como mudanças em sua estrutura e a criação de empresas com funções e responsabilidades específicas de geração, transmissão e distribuição [2]. A reforma do setor elétrico começou em 1993 com a Lei nº. 86.318 e passou por vários projetos de reestruturação. Hoje, opera sob concessão, autorização ou permissão do Estado, provendo serviços públicos de eletricidade à população. Foi consolidado pela Lei 10.848/2004, onde estão estabelecidas as regras que definem o seu

funcionamento, nas atividades típicas de geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica [3].

Em 1996 foi criada pela Lei 9.427 de 26 de dezembro, a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, autarquia em regime especial vinculada ao Ministério de Minas e Energia - MME. A agência tem por finalidade acompanhar, regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica.

Dentre documentos e normativas elaborados pela ANEEL, os Procedimentos de Distribuição - PRODIST [4] são documentos que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho, no que diz respeito ao Sistema Elétrico de Distribuição (SED), e contém 9 módulos.

As concessionárias devem ter como meta central manter fornecimento contínuo de energia e para isto precisam ampliar seus sistemas e melhorar a confiabilidade, o que implica grandes investimentos. Se violarem os indicadores de continuidade definidos pela ANEEL, pagam multas elevadas. Logo, se preocupam, quando na realização do planejamento da expansão da rede, não somente em minimizar custos de investimentos, mas também em considerar o atendimento aos critérios de confiabilidade requeridos para o sistema.

Todas estas mudanças trazem novos desafios aos profissionais que atuam nas empresas do setor elétrico, particularmente aqueles que atuam nas empresas de distribuição, que constitui o elo de conexão dos consumidores com o sistema [2].

O presente trabalho teve por objetivo avaliar a degradação de um cabo condutor elétrico de Alumínio, liga 6201 submetido à poluição atmosférica no litoral do município de Rio Grande – RS.

Trata-se de um material recentemente padronizado pela Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica – CEEE D, previsto para aplicação em condições ambientais adversas, devido às suas características mecânicas e elétricas, como alternativa à utilização de condutores de cobre, devido ao seu elevado custo e atratividade a ações de furto e vandalismo.

## **2. JUSTIFICATIVA**

O alumínio representa um material de grande importância em todas as áreas da indústria. Quando exposto a atmosferas agressivas, pode apresentar processos corrosivos acelerados. Neste trabalho foram estudados os efeitos da exposição de cabo condutor elétrico de alumínio liga 6201, submetido a atmosferas salinas em uma região específica, e seu efeito na degradação do material.

A principal motivação na escolha deste trabalho é no sentido de unir a pesquisa acadêmica com a experiência de 20 anos de atuação profissional na CEEE Distribuição, colocando este estudo à disposição da empresa para validação da padronização do condutor elétrico avaliado no presente trabalho, bem como trazer para a Universidade um pouco das particularidades e desafios encontrados na atuação junto ao Setor Elétrico.

## **3. OBJETIVOS**

### **3.1. Objetivos Gerais**

O Objetivo deste trabalho foi estudar o comportamento de um cabo condutor elétrico de Alumínio, liga 6201, submetido à poluição atmosférica no litoral do município de Rio Grande – RS, verificando a variação no nível de degradação do material a partir de diferentes distâncias em relação à orla marítima.

### **3.2. Objetivos Específicos**

Através da realização de ensaios de microscopia ótica, microdureza Vickers, micrografias MEV e Espectroscopia de Energia Dispersiva e difração de Raios X e, nas diferentes amostras, serão avaliados os seguintes aspectos:

- Avaliar se a exposição do material em regime permanente próximo à costa é capaz de causar alguma alteração na resistência mecânica do material;
- Caso sejam encontradas alterações na resistência mecânica, avaliar se há correlação dos valores encontrados com os locais de onde foram obtidas as amostras, e suas posições em relação à costa;
- Analisar até qual distância da costa ocorre a influência no valor de resistência mecânica das amostras;



- Verificar a ocorrência ou não de alterações microestruturais nas amostras devido ao envelhecimento natural, após o tempo em que estiveram expostas à atmosfera da região;

- Verificar a formação de intermetálicos nas amostras durante o processo de envelhecimento natural;

- Avaliar se a degradação sofrida pelo material durante o tempo estudado foi capaz de provocar alterações significativas na resistência mecânica da liga, a ponto de comprometer a sua utilização em redes de energia elétrica.

## 4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 4.1. Introdução à Corrosão

A necessidade de proteger materiais de todos os tipos (madeira, concreto, aço, alumínio, etc.) contra os processos de degradação, tem motivado um grande desenvolvimento da ciência da corrosão. Estes processos de degradação, que incluem o ambiente atmosférico, solução química, oxidação, cristalização e reações galvânicas, são os meios pelos quais os materiais retornam aos seus estados originais de óxidos, minerais, ou carbono elementar [5].

É importante notar que todos os materiais estruturais têm uma forte tendência a retornar ao seu estado nativo, devido à tremenda quantidade de energia utilizada para convertê-los de sua forma original. Esta energia interna, resultante da radiação solar ou induzida pelo homem, permanece latente no material e é liberada em qualquer oportunidade do material reverter-se ao seu estado de equilíbrio [5].

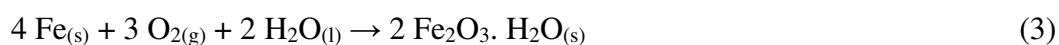
O ferro, por exemplo, atinge a sua estabilidade sob a forma de óxido  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , para a qual caminham todos os seus compostos e derivados.

A corrosão é definida como *“a destruição de uma substância (geralmente um metal) ou de suas propriedades devido a uma reação com seu meio”* [10]. Esta definição não utiliza os termos químico ou eletroquímico, porque ambos poderiam definir somente a corrosão relacionada aos metais, e não teriam sua aplicação para outros materiais que se degradam devido à exposição ambiental. Neste trabalho, no entanto, a corrosão pode ser definida como um processo eletroquímico de oxidação de um metal e, para a maioria dos metais, é um processo espontâneo e contínuo.

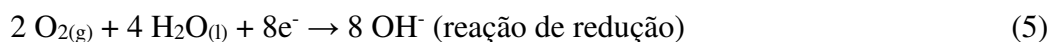
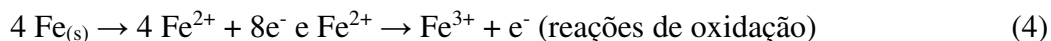
Para que a corrosão ocorra, é necessária a ocorrência simultânea de duas reações: a de oxidação (que libera elétrons) e a de redução (que recebe elétrons):



Por exemplo, o ferro sofre corrosão na presença de água e oxigênio e a reação global pode ser representada por:



A reação (3) pode ser dividida nas reações (4) e (5), uma produzindo elétrons e outra os consumindo:

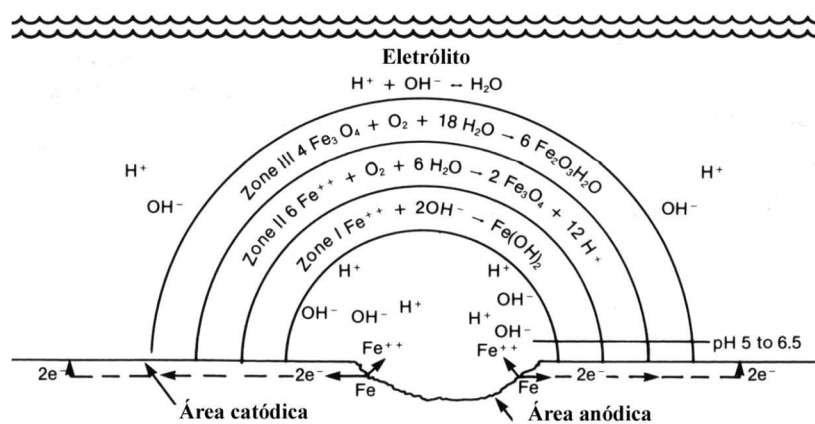


A reação de oxidação (ou anódica), ao gerar íons metálicos em solução, dissolve o metal ou transforma-o em outro composto, produzindo o fenômeno da corrosão. Porém, para que o processo corrosivo prossiga é necessária uma reação de redução (ou catódica) que consuma os elétrons liberados. Caso contrário, a reação de oxidação atinge o equilíbrio e a corrosão cessa [6].

#### 4.1.1. O Ânodo

O ânodo é a área onde o metal se ioniza, passando à solução, ocasionando progressiva perda do metal. A Figura 1 mostra as principais reações químicas que ocorrem no ânodo. A primeira reação na zona anódica ocorre quando o ferro metálico passa à solução como íon ferro, com a liberação de dois elétrons. Na Zona I, que é a área anódica limite do ferro na solução, os íons ferro reagem com íons hidróxidos para formar hidróxido de ferro. Esta reação é importante, pois retira o íon ferro da solução e gera o hidróxido de ferro insolúvel. Isto muda o equilíbrio na célula de corrosão e permite que mais ferro se ionize e passe à solução. O hidróxido de ferro é um precipitado branco transitório, que se forma na superfície do metal corroído.

Figura 1 – Reações Anódicas Principais



Fonte: [5].

A reação que ocorre na Zona II para formar  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (preto), ou óxido de ferro magnético, é uma das mais complexas. Como mostra a Figura 1, os íons ferro reagem com oxigênio e água para formar  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , com a liberação de íons hidrogênio. O hidróxido de ferro na Zona I pode reagir com o oxigênio adicional para formar  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , ou com qualquer íon carbonato disponível nesta área para formar carbonato ferroso.

Na Zona III ocorre uma reação mais direta: o  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  superior reage com o oxigênio para formar óxido de ferro hidratado, ou  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ . Este é o produto amarelo-avermelhado comumente conhecido como ferrugem.

Os íons negativos no eletrólito, como carbonatos, cloretos, sulfatos e hidroxilas, são atraídos para a área anódica por causa dos íons ferro positivos disponíveis neste ponto. Como as hidroxilas reagem com os íons ferro para formar hidróxidos de ferro, um excesso de íons hidrogênio permanece na solução, criando uma condição levemente ácida [5].

#### 4.1.2. O Cátodo

As reações catódicas, apesar de menos complexas que as reações anódicas, são extremamente importantes no controle da velocidade da corrosão que ocorre no ânodo. A reação anódica não pode ocorrer a uma velocidade mais alta que a “acomodação” dos elétrons correspondentes pela reação catódica. A reação que ocorre no cátodo é essencialmente a neutralização dos elétrons que são gerados quando o ferro passa à solução (Figura 2). Os elétrons podem ser neutralizados por uma destas três reações:

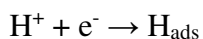
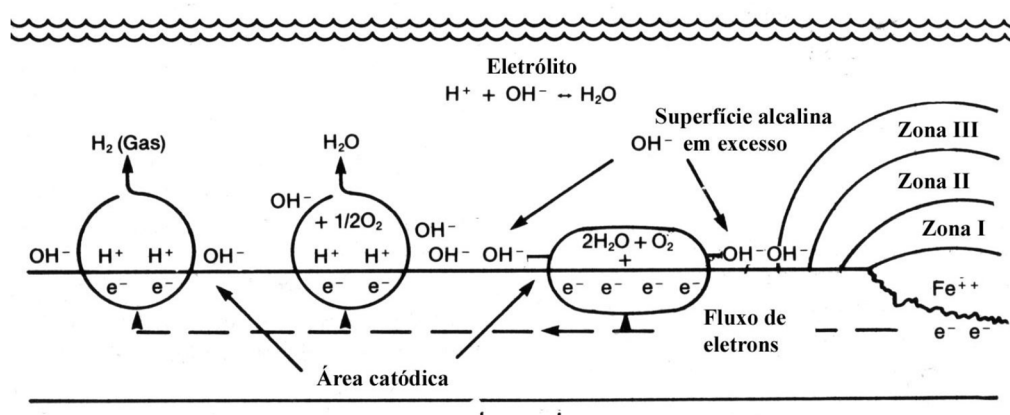


Figura 2 – Reações Catódicas Principais



Fonte: [5].

A reação de neutralização (6) é a dos íons hidrogênio com elétrons para formar hidrogênio gasoso. Onde uma quantidade grande de íon hidrogênio estiver disponível, uma solução ácida, as bolhas de gás formam-se rapidamente. O potencial eletrodo de equilíbrio (em relação ao hidrogênio) do ferro a 25 °C, em contato com uma solução de íons ferro, é -0,44V. O ferro irá, portanto, deslocar o hidrogênio da água espontaneamente [7]. Este é o primeiro passo no processo corrosivo e uma das mais importantes reações químicas envolvendo o ferro.

A reação (7), que também remove hidrogênio da área catódica na superfície metálica, é a do hidrogênio atômico com oxigênio para formar água. Na reação (8), o oxigênio reage com água e elétrons para formar hidroxilas. Esta é uma reação extremamente importante do ponto de vista de um revestimento, já que as hidroxilas são fortemente alcalinas. Quando elas se concentram na área catódica do metal, qualquer revestimento sobre o metal deverá ser fortemente resistente aos álcalis ou tenderá à saponificação e degradação [5].

#### 4.1.3. O Eletrólito

O eletrólito é a solução que está sobre, ao redor, ou que cobre o metal. A condutividade da solução na superfície metálica é a chave para a velocidade do processo corrosivo. Uma solução com condutividade baixa ou alta resistência produz uma reação corrosiva lenta, enquanto uma solução com alta condutividade ou baixa resistência acelera esta reação.

A água pura, apesar de ser um condutor relativamente pobre, ainda contém íons ( $H^+$  e  $OH^-$ ), e a corrosão ocorrerá, ainda que muito lentamente. No caso da água do mar, as células de corrosão são formadas rapidamente, já que a água do mar é altamente ionizada e condutora [5].

#### 4.1.4. O Circuito Externo

Onde o ânodo e o cátodo estão sob a superfície metálica, o metal age como circuito externo [5]. Se há dois tipos de metal, eles devem estar em contato ou devem ter uma conexão externa para que o processo corrosivo possa ocorrer. A condutividade ou a resistência do circuito externo também ajuda determinar a velocidade do processo corrosivo.

#### 4.1.5. Conceito Químico De Uma Célula De Corrosão

No conceito químico de uma célula de corrosão, o ferro penetra na solução no ânodo, reage rapidamente com as hidroxilas negativas, e precipita. Os elétrons movem-se através do metal ou do circuito externo para o cátodo. Neste ponto, os elétrons são neutralizados pelos íons positivos, ou seja, o íon hidrogênio positivo reage com os elétrons tornando-se hidrogênio molecular e deixando um excesso de hidroxilas. Neste caso (a remoção do hidrogênio ou a redução do oxigênio), íons hidroxila estão concentrados no cátodo.

#### 4.1.6. Conceito Elétrico De Uma Célula De Corrosão

Em contraste com o conceito químico, o conceito elétrico do fluxo de corrente é completamente diferente, porém importante já que é utilizado extensivamente na proteção catódica. De acordo com este conceito, o fluxo da corrente elétrica segue do ânodo através da solução para o cátodo. O ânodo é às vezes descrito como a área da superfície metálica na qual a corrente deixa o metal e entra na solução.

O cátodo é geralmente descrito como a área da superfície metálica na qual a corrente flui da solução e então retorna por meio do circuito externo ao ânodo. O fluxo de corrente elétrica, então, é do cátodo através do circuito externo para o ânodo e do ânodo através da solução para o cátodo, para completar o circuito. Este conceito é obviamente oposto àquele do fluxo de elétrons, que flui do ânodo para o cátodo através do circuito externo.

## 4.2. Corrosão Atmosférica

A corrosão atmosférica é definida como a corrosão ou degradação de materiais expostos ao ar e aos seus poluentes sem que estejam imersos em um líquido [8]. É provavelmente a forma mais comum de corrosão, porém ainda pouco compreendida, talvez pelo fato da atmosfera ser um meio cujas propriedades físico-químicas mudam continuamente com o tempo, o que torna difícil às generalizações e previsões. Ainda existem inúmeras dúvidas sobre os mecanismos que governam as reações e as variáveis que influenciam a cinética com que se desenvolvem os processos de corrosão atmosférica.

Uma característica importante da corrosão atmosférica é tratar-se de um processo descontínuo, sendo necessário um filme de eletrólito superficial com uma determinada espessura para que as reações catódicas e anódicas possam ocorrer [9]. Na atmosfera, o metal não é corroído por grandes quantidades de eletrólitos e geralmente a corrosão opera de tal forma que toda a superfície metálica funciona como cátodo e ânodo ao mesmo tempo [10].

Existem vários fatores que compõem a atmosfera, tanto químicos quanto físicos. É composta normalmente por uma mistura de gases, sendo os principais o oxigênio, o nitrogênio e o vapor d'água. No entanto, contém uma série de contaminantes, como fumaça, cinzas, partículas em suspensão, partículas salinas e gases, provenientes de unidades industriais, de motores de combustão interna e de outras fontes naturais e artificiais. Sua proporção é variável segundo a proximidade dessas fontes e as condições climáticas locais, participando ativamente no processo de deterioração dos materiais [11].

A seguir, será apresentada uma breve descrição dos principais fatores climáticos e ambientais que afetam a velocidade de corrosão atmosférica.

### 4.2.1. Umidade

Sendo a corrosão atmosférica um fenômeno essencialmente eletroquímico, a água existente na atmosfera, sob diferentes formas, constitui um dos fatores mais importantes do processo corrosivo. A água que se deposita sobre a superfície metálica pode ser proveniente de processo de adsorção e de condensação, que são determinadas pela umidade relativa do ar [11].

A umidade relativa é a relação, em porcentagem, entre a quantidade de vapor de água existente no ar e a quantidade máxima que o ar pode conter, na mesma temperatura. Esta umidade também pode ser expressa em função da pressão. Sendo  $p$  a pressão parcial

do vapor existente a uma determinada temperatura,  $p_s$  a pressão de saturação a essa mesma temperatura, e UR a umidade relativa, tem-se:

$$UR = \frac{p}{p_s} \times 100 \quad (9)$$

VIANA (1980) [3] constatou a rápida aceleração do processo corrosivo quando a umidade relativa atingia um valor crítico. Este valor é denominado umidade crítica, definida como a umidade relativa acima da qual o metal começa a corroer-se de maneira apreciável. A umidade crítica para um metal, em um determinado ambiente, depende da presença de contaminantes e das propriedades higroscópicas dos produtos de corrosão formados.

O tempo de superfície úmida é uma variável crítica com relação à extensão da corrosão [9]. Ele indica o tempo durante o qual a superfície metálica está coberta por um filme de água que torna possível a corrosão, determinando, portanto, a duração do processo eletroquímico. Este tempo varia com as condições climáticas locais e depende da umidade relativa do ar, da duração e frequência das chuvas, névoa, orvalho, temperatura do ar e da superfície metálica, velocidade dos ventos, horas de luminosidade, etc. A natureza do produto de corrosão formado também pode afetar significativamente o tempo de superfície úmida. Se o filme do produto de corrosão é microporoso, a condensação capilar pode causar a condensação de umidade bem abaixo do valor crítico de umidade relativa.

A espessura da camada eletrolítica é também um fator importante no processo de corrosão. A água começa a aderir à superfície metálica polida em uma umidade relativa estimada de 55% e forma um filme fino, que aumentará em espessura quando a umidade relativa aumentar. Para que a corrosão seja possível, é necessário mais de uma monocamada de água na superfície exposta. Por exemplo: para uma liga NiFe, a 25% de UR tem-se uma monocamada, a 50% UR duas monocamadas e a 75% UR cinco monocamadas de água [10]. A importância de se ter várias monocamadas de água baseia-se no fato de que a constante dielétrica da água é muito baixa para poucas monocamadas, e, conseqüentemente, dificulta a dissolução dos íons agressivos para formar uma solução condutora [10].

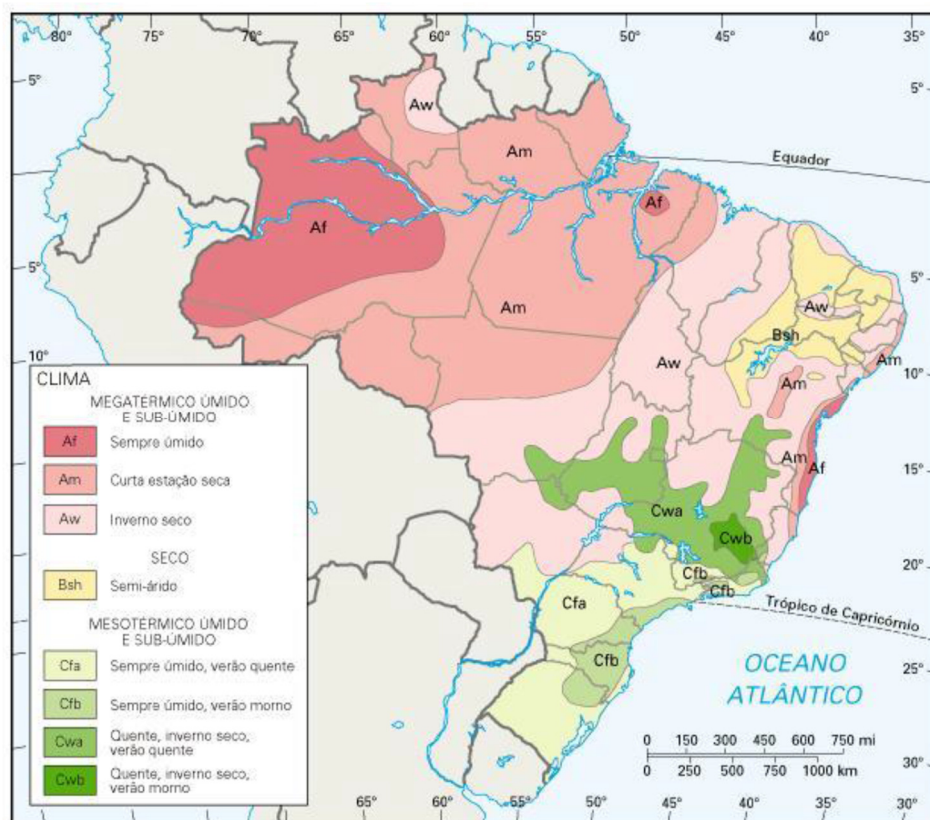
Em uma atmosfera relativamente limpa, o valor da umidade crítica para o aço carbono situa-se em torno de 70%, porém, em atmosferas contaminadas com poluentes



industriais ou sais marinhos, ela é passível de diminuir consideravelmente, podendo se situar entre 50 e 60%. Para VIANNA (1980) [3], as umidades críticas, para a maioria dos metais, estão na faixa de 70 a 80%.

A Figura 3 mostra o mapa do Brasil com as respectivas classificações climáticas por região [12].

Figura 3 – Mapa Climático do Brasil.



Fonte: [12].

Grande parte do território brasileiro apresenta umidade relativa média anual superior a 70%, chegando a valores superiores a 80% na faixa litorânea e na região norte. Nessas faixas de umidade relativa elevada situam-se também os centros industriais mais importantes do país [11]. Levando-se em conta os valores de umidade crítica acima citados, é de se esperar alta incidência de corrosão atmosférica no Brasil.

A classificação de Köppen, que se baseia fundamentalmente na temperatura, na precipitação e na distribuição destes valores durante as estações do ano, é mostrada na Tabela 1, adaptada para o Brasil [13].

Tabela 1 – Classificação Climática de Köppen adaptada ao Brasil.

Símbolos Climáticos	Características	Regime de Temperatura e Chuvas	Área de Ocorrência
Am (equatorial)	Quente com uma estação seca (primavera)	Temperaturas elevadas: médias entre 25°C e 27°C, pluviosidade elevada: médias de 1.500 a 2.500 mm/ano.	Maior parte da Amazônia
Af (equatorial)	Quente sem estação seca		Porção oriental e noroeste da região Norte
Aw (tropical)	Quente, com chuvas de verão	Temperatura média entre 19°C e 28°C, pluviosidade média inferior a 2.000 mm/ano.	Brasil Central e Roraima
Aw (tropical)	Quente, com chuvas de verão e outono		Litoral norte
As (tropical)	Quente, com chuvas de inverno e outono	Duas estações bem definidas: o verão (chuvoso) e o inverno (seco).	Litoral oriental do nordeste (Zona da Mata)
Bsh (semi-árido)	Quente e seco, com chuvas de inverno	Médias anuais térmicas superiores a 25°C. Pluviosidade média anual inferior a 1.000 mm/ano com chuvas irregulares.	Sertão do Nordeste
Cwa (tropical de altitude)	Chuvas de verão e verões rigorosos	Médias térmicas entre 19°C e 27°C, pluviosidade média de 1.500 mm/ano; chuvas de verão.	Interior do Sudeste e pequena porção do Mato Grosso do Sul
Cwb (tropical de altitude)	Chuvas de verão e verões brandos		Terras altas do Sudeste
Csa (tropical de altitude)	Chuvas de outono-inverno e verões quentes		Chapada da Borborema, região Nordeste
Cfa (subtropical)	Chuvas bem distribuídas e verões rigorosos	Médias térmicas entre 17°C e 19°C, pluviosidade média de 1.500 mm/ano; chuvas bem distribuídas.	Áreas mais baixas da região Sul (litoral e sul da região)
Cfb (subtropical)	Chuvas bem distribuídas e verões brandos		Áreas mais altas do planalto Meridional e serras

Fonte: [13].

#### 4.2.2. Temperatura

A temperatura é um fator importante a ser considerado na corrosão atmosférica. Se por um lado o seu aumento acelera as reações químicas, por outro, ela modifica a permanência do eletrólito sobre a superfície, fazendo com que locais de temperatura relativamente baixas apresentem taxas de corrosão maiores do que aqueles de temperatura mais elevada. No entanto, a combinação de alta temperatura e o contato prolongado do eletrólito com o metal resulta em corrosão mais acelerada [11].

As flutuações de temperatura também têm grande influência na velocidade de corrosão atmosférica, pois acarretam alterações na umidade relativa. Uma queda brusca de temperatura pode aumentar a umidade relativa, chegando até mesmo a ultrapassar o valor de umidade crítica [11].

#### 4.2.3. Radiação

Alguns fenômenos de corrosão não existem ou têm sua velocidade diminuída na ausência de luz solar. No caso de substratos pintados, a foto-oxidação induzida pela radiação UV pode produzir, entre outros efeitos, a oxidação das ligações duplas, cisão dos segmentos dos polímeros e dos entrecruzamentos. Todos estes processos mudam a composição do revestimento, agindo contra sua estabilidade química. Como resultado, a resistência do revestimento diminui e aumentam as tensões higrotérmicas, afetando negativamente a adesão e coesão do mesmo. Os resultados práticos diretos são conhecidos: destacamento e/ou geração de trincas no revestimento que causa posterior corrosão dos substratos [14].

#### 4.2.4. Chuvas e Ventos

A chuva pode atuar de modo diferente, de acordo com o material exposto e com as condições atmosféricas presentes. Em atmosferas industriais, a chuva pode conter poluentes e, em atmosferas marinhas, um grande teor de cloretos. Longos períodos de chuva podem favorecer a corrosão atmosférica, uma vez que mantém sobre a superfície o filme de eletrólito essencial ao processo corrosivo. Por outro lado, chuvas periódicas tendem a eliminar os contaminantes da superfície, diminuindo a condutividade do eletrólito, e conseqüentemente, a corrosão [11].

A corrosão é muito maior onde a chuva não “lava” completamente a superfície, onde sais ou outros contaminantes acumulam-se e estão sujeitos à umidade. É verdade que áreas cobertas também mantêm a umidade superficial por um período mais longo e que a concentração do eletrólito e o tempo de exposição são maiores.

Então, as áreas de uma ponte que estão expostas à chuva e lavagem da superfície são geralmente menos corroídas que as áreas que estão cobertas. Similarmente, telhas cobertas não lavadas têm um tempo de vida muito menor que aquelas que são expostas e lavadas [5].

Os ventos geralmente ocasionam flutuações rápidas na temperatura e na umidade, e influenciam consideravelmente a deposição de contaminantes sobre a superfície dos materiais. Nas zonas marítimas, a direção dos ventos é de grande importância em virtude da concentração de cloretos existentes [15].

#### 4.2.5. Gases

Em um ambiente seco, os gases presentes na atmosfera não são considerados corrosivos. Porém, na presença de umidade, alguns deles tornam-se extremamente agressivos e aceleram o processo de corrosão. Exemplos destes gases são dióxido de enxofre, sulfeto de hidrogênio, amônia, cloro e o próprio oxigênio [5].

A seguir segue uma análise dos efeitos dos principais gases na corrosão atmosférica.

##### 4.2.5.1. Oxigênio

O oxigênio não é considerado um contaminante, mas é um elemento essencial do processo de corrosão. Sem a presença de oxigênio, o processo ocorre muito lentamente ou é interrompido completamente.

O oxigênio é extremamente importante na maioria das reações de corrosão por remover os íons hidrogênio do cátodo e permitir que elétrons adicionais sejam neutralizados. Já que uma superfície eletrolítica apreciável é formada pelo vapor d'água, o oxigênio irá se dissolver na solução eletrolítica e promover a reação catódica. Como a camada de água na superfície é extremamente fina, a difusão do oxigênio para a superfície do metal ocorre muito rapidamente e aumenta a velocidade de corrosão [5].

##### 4.2.5.2. Dióxido de Enxofre

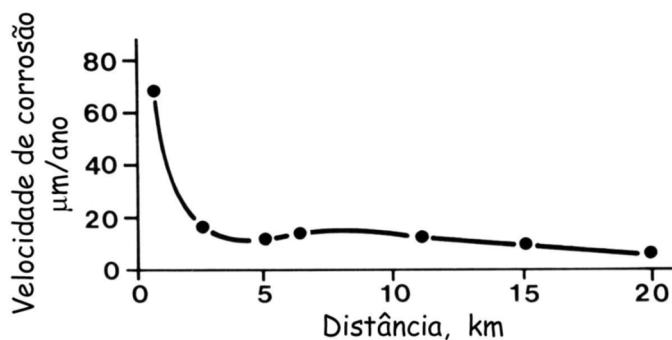
O dióxido de enxofre tem sido um dos poluentes mais estudados. É o principal agente agressivo encontrado em atmosferas urbanas e industriais, sendo emitido em quantidades consideráveis durante a queima de combustíveis fósseis como petróleo, carvão, gás natural, etc.

O SO<sub>2</sub> é um gás extremamente reativo, sendo absorvido nas superfícies metálicas, e sob condições de umidade, as superfícies de óxido metálico catalisam o SO<sub>2</sub> a trióxido de enxofre (SO<sub>3</sub>) e promovem a formação de ácido sulfúrico de acordo com a reação [16]:



O tempo de vida do SO<sub>2</sub> na atmosfera é geralmente 0,5 a 2 dias, o que corresponde a uma distância média de transporte em torno de poucos quilômetros. A intensidade da ação dos gases é proporcional à distância da fonte, como pode ser observado na Figura 4 [16].

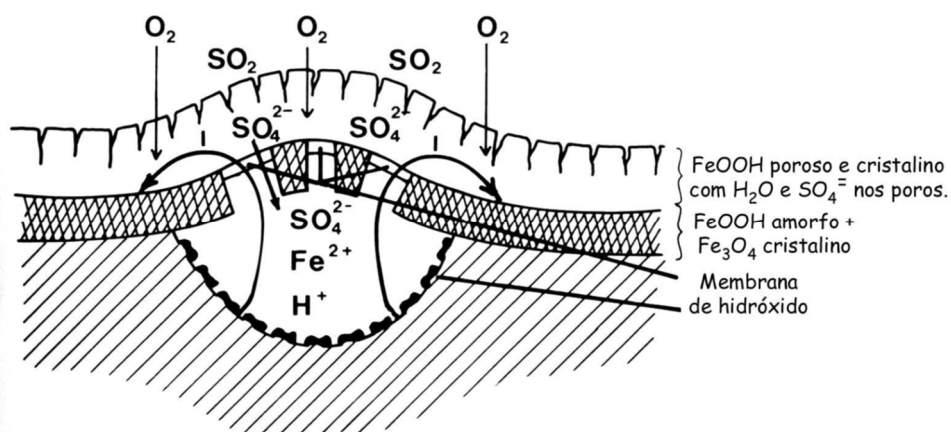
Figura 4 – Efeito da Distância da Fonte sobre a Velocidade de Corrosão.



Fonte [16].

A Figura 5 representa esquematicamente o mecanismo de ação dos íons sulfato sobre o aço [16].

Figura 5 – Esquema de uma Célula de Corrosão com Íons Sulfato sobre o Aço.



Fonte [16].

#### 4.2.5.3. Sulfeto de hidrogênio

O sulfeto de hidrogênio,  $H_2S$ , pode ser gerado naturalmente pela decomposição dos compostos sulfurosos orgânicos ou pela bactéria redutora de sulfatos em rios poluídos. Uma de suas fontes principais, no entanto, são as refinarias de petróleo [11].

Reações com sulfeto são diferentes das outras reações de corrosão, pois elas podem ocorrer sob condições relativamente secas. O  $H_2S$  reage diretamente com o metal e não requer um eletrólito para que a reação de corrosão ocorra. O  $H_2S$  não reage diretamente apenas com o ferro, mas também com alguns compostos de ferro que aumentam a velocidade de corrosão, como fica evidente das seguintes reações:



O sulfeto de ferro é muito reativo com oxigênio. Quando o oxigênio entra em contato com o FeS, reage de acordo com a seguinte equação para formar óxido de ferro magnético [11]:



Existem outros gases contaminantes como o NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, Cl<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> e CO<sub>2</sub> que não serão abordados neste trabalho.

#### 4.2.6. Cloretos

Os íons cloretos são extremamente agressivos à maioria dos materiais geralmente empregados no setor elétrico. Sua principal fonte é a água do mar, onde eles se encontram combinados ao sódio, magnésio e cálcio. Estes sais são higroscópicos, promovem a condensação de água sobre os materiais e consequentemente, a aceleração da corrosão [17].

Um dos mecanismos para formação de um eletrólito a partir do vapor da umidade atmosférica é o abaixamento do ponto de orvalho (ponto onde o ar não pode mais conter a umidade e o vapor condensa como água na superfície) pelos sais higroscópicos solúveis em água, que se depositam e então formam sais metálicos solúveis na superfície. De acordo com [18], este processo é muito mais importante que a conversão do vapor d'água em líquido na superfície metálica.

O transporte de íons cloretos é feito pelos ventos que arrastam as gotículas de água salgada, nas regiões litorâneas, em direção ao continente. Por isso, há um pronunciado gradiente de concentração de cloretos com relação à distância do mar, que depende principalmente da velocidade e direção dos ventos [15]. Diferente dos outros agentes externos que produzem ataques quase que generalizados dos metais, como o SO<sub>x</sub> e o NO<sub>x</sub>, os cloretos produzem ataques localizados na forma de perfurações muito pequenas e que se propagam rapidamente, chamados de *pits*.

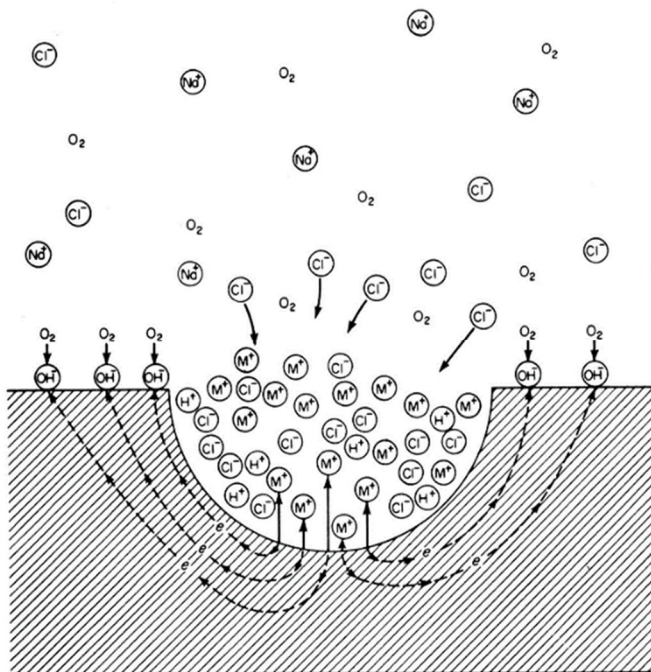
O grave inconveniente dos *pits* é que muitas vezes eles são detectados somente após a estrutura quebrar por falha mecânica, já que dificilmente são observados antes, devido ao seu pequeno tamanho. O processo de corrosão por *pits* é um tipo único de

reação anódica autocatalítica. Isto é, o processo de corrosão dentro do *pit* cria condições necessárias que estimulam a contínua atividade dentro do mesmo, como é mostrado esquematicamente na Figura 6. Este esquema mostra um metal M em contato com uma solução aerada de NaCl. Dentro do *pit* ocorre uma rápida dissolução, e nas superfícies adjacentes ocorre a reação de redução do oxigênio.

A rápida dissolução do metal dentro do *pit* tende a produzir um excesso de cargas positivas nesta área, resultando na migração dos íons cloreto para manter a eletroneutralidade. Logo, dentro do *pit* há uma alta concentração de MCl e, como resultado da hidrólise, uma alta concentração de íons hidrogênio  $H^+$ . Os dois tipos de íons,  $H^+$  e  $Cl^-$ , estimulam a dissolução da maioria dos metais e ligas [16].

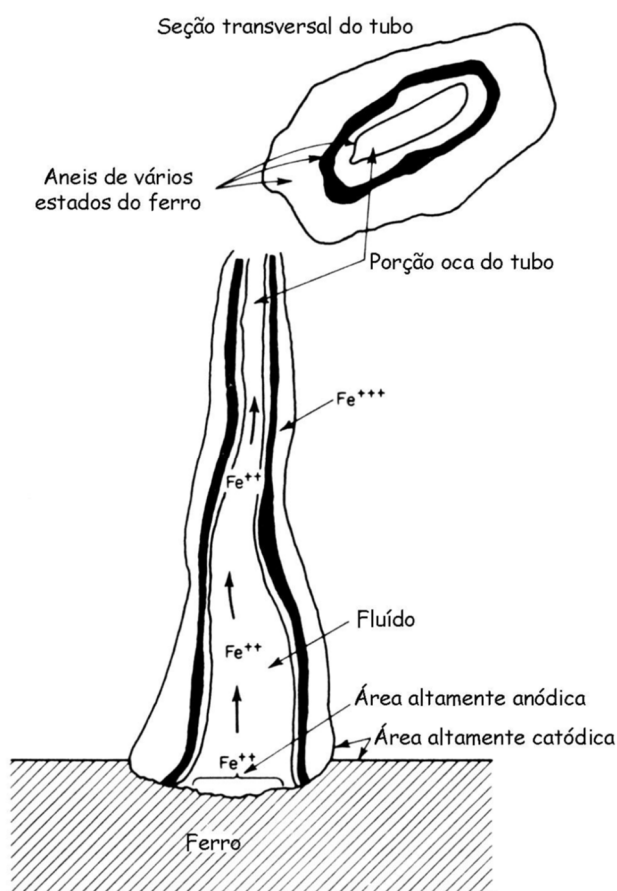
A Figura 7 mostra um esquema dos produtos de corrosão geralmente formados sobre um *pit*. Na interface entre o *pit* e a superfície adjacente, hidróxido de ferro é formado pela interação entre os íons hidroxila,  $OH^-$ , formados pela reação catódica e os produtos de corrosão do *pit*. Sem dúvida, estes mecanismos descritos para corrosão localizada em soluções não diferem muito do que ocorre em regiões litorâneas sob corrosão atmosférica [16].

Figura 6 – Processo Autocatalítico que ocorre na Corrosão Localizada (Pits).



Fonte: [16].

Figura 7 – Produtos de Corrosão de um Pit.



Fonte: [16].

#### 4.2.7. Partículas Sedimentáveis

A quantidade de partículas em suspensão na atmosfera, bem como sua composição, é bastante variada, dependendo do tipo de atmosfera. Em zonas rurais, as partículas são constituídas principalmente de compostos orgânicos e inorgânicos existentes na superfície terrestre. Em regiões urbanas e industriais, elas apresentam elevada porcentagem de poluentes. Geralmente, estas partículas absorvem com facilidade a umidade do ar, dando origem a eletrólitos ativos, que aceleram o processo corrosivo [11].

### 4.3. TIPOS DE ATMOSFERA

As diferentes combinações dos parâmetros acima mencionados dão lugar a distintos tipos de atmosferas, classificadas como: rural, urbana, industrial e marinha ou a



combinação delas. Podem ainda subdividir-se em secas ou úmidas, quentes ou frias, com grande diferença na agressividade devido a estes fatores [8].

A atmosfera rural é normalmente classificada como aquela onde há pouco ou nenhum material iônico solúvel para causar um eletrólito forte, mas pode conter partículas orgânicas e inorgânicas. O termo rural indica uma área longe das condições marinhas e industriais, de modo que a corrosão nestas áreas depende principalmente da temperatura, umidade e retenção de umidade nas superfícies metálicas. Seu principal agente de corrosão é a umidade. Atmosferas áridas ou tropicais são casos especiais do ambiente rural por suas extremas umidades relativas e condensações [8]. A atmosfera rural é geralmente a menos corrosiva.

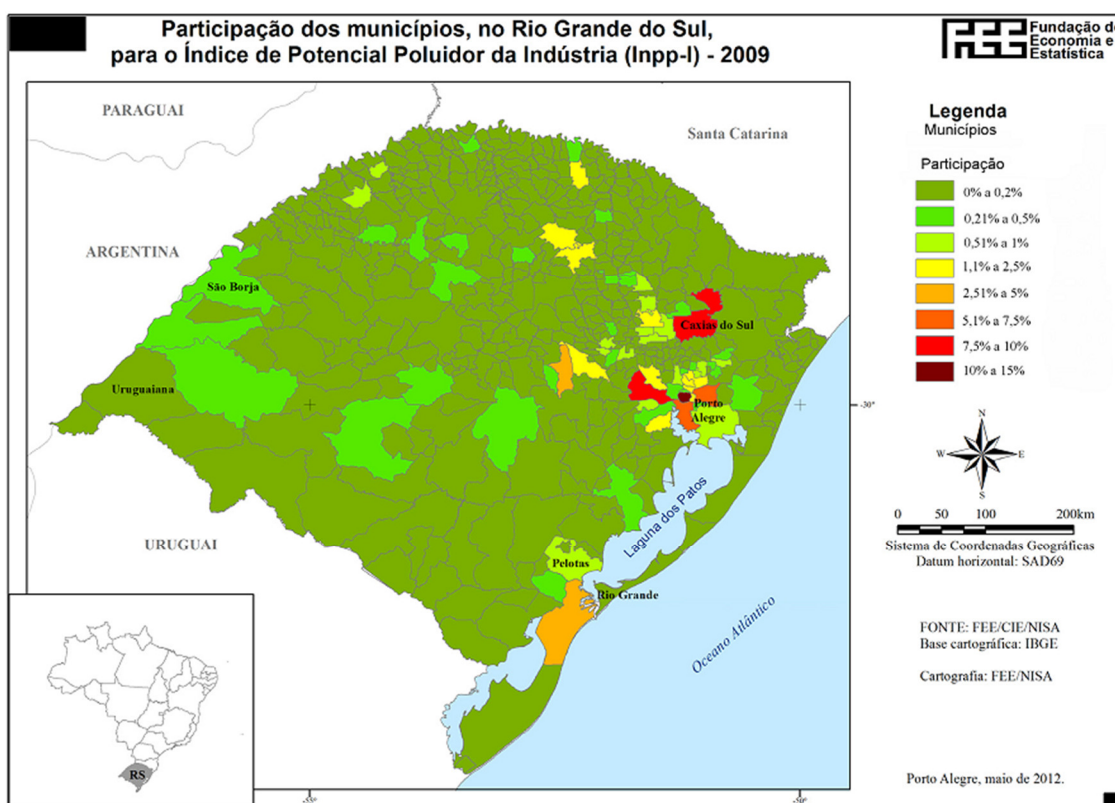
A atmosfera urbana tem maior nível de contaminação que a rural, devido à contribuição dos produtos de queima dos motores de combustão e da fuligem. Apresenta contaminantes típicos como  $\text{SO}_x$  e  $\text{NO}_x$ , sendo característica de grandes centros populacionais.

A atmosfera industrial contém nível superior de contaminantes em relação à urbana, podendo apresentar dióxido de enxofre, cloretos, fosfatos, nitratos e outras emissões industriais específicas. Estas emissões combinadas com precipitação ou umidade formam um eletrólito muito corrosivo. Nas cidades ou em áreas industriais, a velocidade de corrosão também depende dos fatores de temperatura, umidade e retenção de umidade. Além disso, dependem da quantidade de materiais iônicos solúveis que são retidos na camada úmida na superfície metálica. Em áreas onde a umidade é mantida por longos períodos de tempo, a corrosão é ainda mais severa.

A atmosfera marinha caracteriza-se pela presença de partículas de sais marinhos, sob forma de cristais ou gotículas de água salgada. É o ambiente atmosférico mais severo quanto à corrosão. A umidade em uma atmosfera marinha é geralmente alta, mas a temperatura é variável, dependendo do clima (tropical, temperado ou ártico) e da quantidade de luz solar. Tem sido demonstrado que a quantidade de cloretos também é variável, diminuindo com o aumento da distância do oceano e sendo influenciada pela direção e velocidade dos ventos [10].

Conforme pode ser verificado na figura 8, o município de Rio Grande – RS, possui elevado potencial poluidor, quando comparado aos outros municípios do estado, devido a fatores como atividade industrial, população e número de veículos automotores.

Figura 8 – Índice de Potencial Poluidor da Indústria, por Município.



Fonte: [19].

#### 4.4. O Alumínio

O alumínio é um dos metais não-ferrosos com maior abundância da crosta terrestre, condição que favorece a sua utilização em grande escala. Devido às suas propriedades, tem sido utilizado em diversas aplicações como embalagens de alimentos e medicamentos, como material estrutural na construção civil, nas indústrias automobilística e aeronáutica, entre outras aplicações.

As propriedades que o tornam atraente para diversas aplicações são o seu baixo custo, baixa densidade, elevada razão resistência mecânica/densidade, elevadas condutividades térmica e elétrica e até mesmo a sua aparência. Possui rede cristalina cúbica de face centrada, com baixa densidade ( $2,7 \text{ g/cm}^3$ ), baixa temperatura de fusão ( $660 \text{ }^\circ\text{C}$ ) e alta eletrocondutividade  $3,5 \times 10^4 [\Omega \cdot \text{cm}]^{-1}$ .

O alumínio é obtido a partir da bauxita, a qual passa por processos de mineração, refinação para obtenção da alumina e então a redução da alumina em alumínio metálico.

Este processo envolve um grande consumo de energia, da ordem de 15 MWh por tonelada de alumínio produzido.

A energia introduzida para a sua obtenção na forma metálica representa também a sua elevada tendência a retornar ao estado oxidado. Após a redução do óxido em metal, existem vários processos posteriores, como: laminação, estampagem, extrusão, trefilação, forjamento, soldagem e usinagem, antes de sua aplicação final [31].

O alumínio possui facilidade de conformação, devido à alta maleabilidade e ductilidade, possibilitando adequar a sua forma aos mais variados projetos. Desta forma, pode-se afirmar que o alumínio possui alta trabalhabilidade, característica definida como sendo a capacidade de ser submetido a deformações sem sofrer fissuras, além de endurecer gradativamente.

O bom desempenho do alumínio e suas ligas como transmissor de eletricidade é reconhecido pela indústria elétrica, que o utiliza em larga escala em forma de vergalhão e arame os quais formam fios e cabos condutores de eletricidade.

A sua condutividade elétrica, apesar de inferior à do cobre, sendo cerca de  $2/3$ , permite sua utilização na fabricação de condutores elétricos de menor custo, e visto que é menos denso que outros metais [32].

O crescente uso do alumínio nos diversos setores industriais depende, entretanto, de pesquisas acadêmicas que possibilitem desvendar suas potencialidades e características específicas que lhe são atribuídas quando da adição de outro elemento químico, formando o que denominamos de liga.

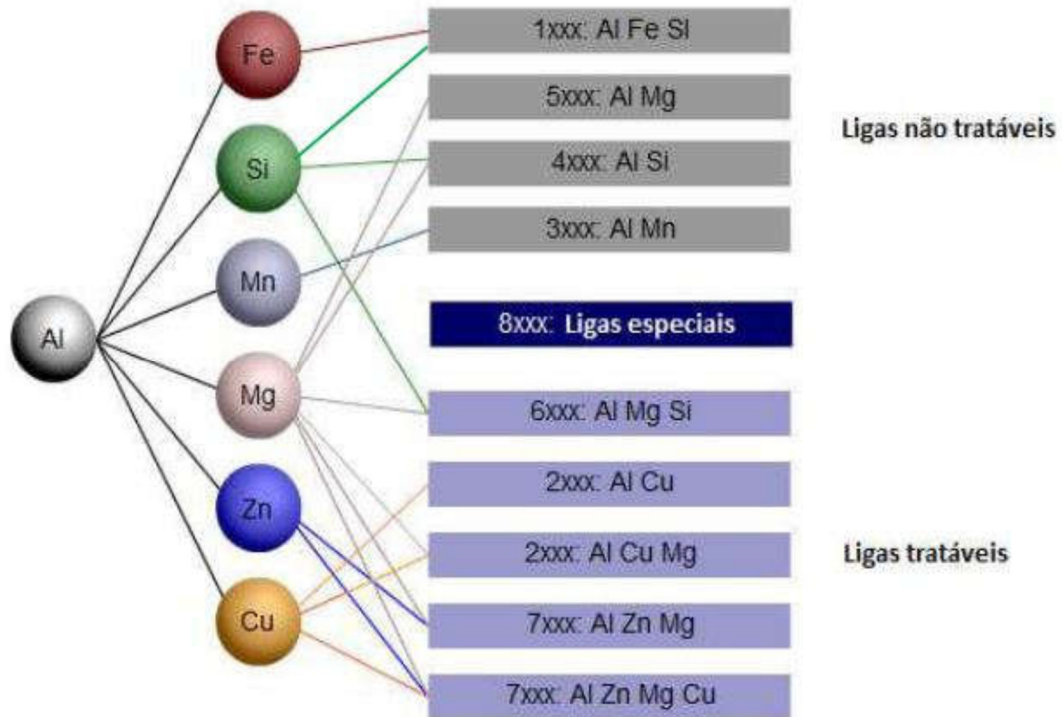
#### 4.4.1. Ligas de Alumínio

A utilização de ligas de alumínio pelas indústrias automotiva, naval e aeroespacial apresentou grande crescimento a partir do começo do século XIX. Este crescimento deve-se às propriedades do material, como baixa relação peso/resistência, resistência mecânica, fácil conformabilidade e resistência à corrosão.

Ligas de alumínio podem ser obtidas por meio de dois processos principais: fundição e forjamento, sendo subdivididos em tratáveis e não tratáveis termicamente. Elementos de liga são adicionados ao alumínio para conferir maior resistência mecânica ao material. Entre os elementos mais presentes em ligas estão: cobre, magnésio, manganês, silício e zinco. A figura 9 apresenta a associação entre alumínio e elementos

formadores das principais ligas comerciais, com indicação da possibilidade de tratamentos térmicos.

Figura 9 – Séries das ligas alumínio com seus principais elementos de liga mostrando as tratáveis e as não tratáveis termicamente.



Fonte: [33].

A Tabela 2 apresenta a designação de ligas de alumínio de acordo com classificação imposta por *International Alloy Designation System* (IADS), com suas principais aplicações.

Tabela 2 – Família de ligas de alumínio, seus principais elementos de liga e aplicações gerais.

<b>Série</b>	<b>Principal(is) elemento(s) de liga</b>	<b>Termicamente tratáveis</b>	<b>Aplicações</b>
1XXX	Alumínio puro	-	Indústria química e elétrica
2XXX	Cu	X	Aeronáutica
3XXX	Mn	-	Aplicabilidade geral
4XXX	Si	-	Fios de soldura e ligas de brazagem
5XXX	Mg	-	Transporte
6XXX	Mg, Si	X	Estruturas e transporte
7XXX	Zn	X	Aeronáutica
8XXX	Sn, Li, Fe, Cu, Mg	X	
9XXX	Série Livre	-	

Fonte: [34].

As ligas de alumínio são identificadas por um número de quatro dígitos, sendo que o primeiro número identifica os principais elementos de liga e os três últimos, o grau de pureza e/ou composição química da liga.

É conveniente dividir as ligas de alumínio em duas grandes categorias: fundidos e trabalhados. Cada uma dessas categorias é ainda subdividida em classes conforme sua composição. Muitas ligas respondem a tratamentos térmicos baseados na solubilidade de fases. Dentre esses tratamentos incluem-se a solubilização e o envelhecimento (artificial ou natural).

A resistência mecânica em ligas de alumínio está associada com o grau de refino da estrutura. Com maior refinamento, a distribuição de fases secundárias torna-se mais homogênea, provocando bloqueio ao deslocamento de discordâncias.

As propriedades das ligas dependem da correlação entre a composição química e a microestrutura desenvolvida durante a solidificação e os subseqüentes tratamentos térmicos. Além disso, para ligas obtidas por conformação mecânica, as propriedades finais também dependem do processo de deformação usado.

As ligas de alumínio para o trabalho mecânico são divididas em duas categorias: as termicamente tratáveis e as não termicamente tratáveis (Fig. 9). As ligas de alumínio

não tratáveis não podem ser endurecidas por precipitação. A sua dureza pode ser aumentada por trabalho a frio gerado durante a trefilação, forjamento, laminação, extrusão ou outros métodos de conformação mecânica controlada a frio [34]. Incluem-se neste grupo as ligas das séries 1XXX, 3XXX, 4XXX e 5XXX. Já as termicamente tratáveis são endurecíveis por aquecimento até completa solubilização, seguido de resfriamento rápido e subsequente endurecimento por precipitação à temperatura ambiente (envelhecimento natural) ou em temperaturas moderadamente elevadas (envelhecimento artificial). As ligas tratáveis são, entre outras, das séries 2XXX, 6XXX e 7XXX [34].

As propriedades mecânicas das ligas de alumínio são fortemente dependentes da composição química, tratamento térmico e trabalho a frio. As ligas de alumínio da série 6XXX utilizam magnésio e silício, na forma de composto intermetálico  $Mg_2Si$  (silicato de magnésio), cuja precipitação provoca o endurecimento das ligas desta série.

O desenvolvimento de ligas de alumínio tem como um de seus principais objetivos a obtenção de ligas mais resistentes. Para se alcançar esse objetivo, têm-se combinado composições químicas inéditas, novos tratamentos térmicos e ensaios mecânicos e, conseqüentemente, a sua influência nas propriedades dessas novas ligas. De uma forma geral, os métodos mais comuns utilizados para aumento de resistência mecânica são [35]:

- Ligas não tratáveis termicamente: o ganho de resistência mecânica se dá por meio de constituintes de segunda fase, elementos de liga em solução sólida e trabalho mecânico por deformação a frio;

- Ligas tratáveis termicamente: o mecanismo de endurecimento é resultado da dissolução de elementos de liga em uma solução sólida, com a posterior precipitação.

Na literatura, encontra-se, em grande quantidade, pesquisas relacionadas aos dois tópicos mencionados. Por outro lado, há poucos trabalhos que correlacionam microestruturas, resultantes de processos de fundição, com propriedades mecânicas, fazendo com que se torne um nicho a ser explorado [36].

Segundo [37] após os quatro dígitos que identificam a liga de alumínio, existe uma letra separada por um hífen que identifica se a liga está nos seguintes estados:

- F – como fabricada: aplica-se aos produtos obtidos através de processos de conformação em que não se emprega qualquer controle especial sobre as condições térmicas ou de encruamento. Não se especificam limites para as propriedades mecânicas;

- O – recozida: aplica-se aos produtos acabados, no estado em que apresentam o menor valor de resistência mecânica;

- H – encruada: aplica-se aos produtos em que se aumentou a resistência mecânica por deformação plástica a frio e, que podem ou não, ser submetidos a um recozimento complementar para produzir amolecimento parcial ou a um processo de estabilização. É utilizado para as ligas não-tratáveis termicamente;

- W – solubilizado: aplica-se somente a algumas ligas, as quais envelhecem naturalmente à temperatura ambiente após o tratamento de solubilização. Esta classificação é especificada somente quando o período de envelhecimento natural, após o resfriamento brusco;

- T – Tratada termicamente: aplica-se aos produtos que sofrem tratamento térmico com ou sem deformação plástica complementar, que produz propriedades físicas estáveis e diferentes das obtidas com “F”, “O” e “H”. A letra “T” deve ser seguida por um ou mais dígitos que indicam a sequência dos processos básicos realizados: tratamentos térmicos ou deformações plásticas.

#### 4.4.2. Tratamentos Térmicos Aplicados nas Ligas de Alumínio

##### 4.4.2.1. *Têmperas*

A têmpera é uma condição aplicada ao metal ou liga, através de deformação plástica a frio ou de tratamento térmico, propiciando-lhe estrutura e propriedades mecânicas características [38].

Ainda que a resistência original possa ser aumentada agregando-se certos elementos, as propriedades mecânicas das ligas, com exceção de algumas ligas para fundição, não dependem apenas da sua composição química. Semelhante a outros metais, o alumínio e suas ligas endurecem e aumentam sua resistência quando trabalhadas a frio, como por exemplo, uma chapa laminada a frio. Além disso, algumas ligas de alumínio possuem a valiosa característica de responder ao tratamento térmico, adquirindo resistências maiores do que as que podem ser obtidas apenas através do trabalho a frio.

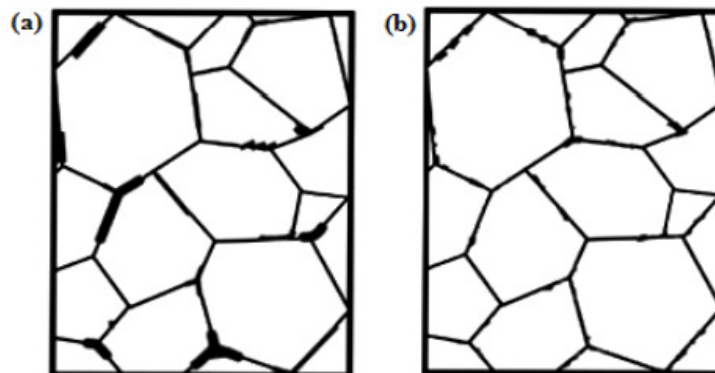
As ligas de alumínio podem dividir-se convenientemente em dois grupos: as ligas tratáveis termicamente, proporcionando-lhes maior resistência, e as ligas não tratáveis termicamente, cuja resistência só pode ser aumentada através do trabalho a frio e posteriormente, sofrer o tratamento térmico para o aumento da resistência mecânica, as ligas não tratáveis termicamente podem ser submetidas a tratamentos térmicos como de estabilização e recozimento plenos ou parciais [40].

#### 4.4.2.2. Homogeneização

Esse tratamento térmico é realizado em temperaturas em torno de 500 °C dependendo da liga, e seu objetivo é diminuir as segregações e criar estruturas mais estáveis e controlar algumas características da indústria metalúrgica, como, as suas propriedades mecânicas, estampabilidade, tamanho de grão, e ainda proporcionando o aumento da ductilidade e melhoria da estabilidade dimensional [41].

O tempo e a temperatura aplicados dependem da taxa de difusão e da estrutura original da peça, no entanto, ao utilizar temperaturas mais elevadas no processo, consegue-se uma homogeneização mais rápida, porém, o material ficará mais exposto a efeitos nocivos como a corrosão [37]. A Figura 10 (a), (b) mostra a diferença da estrutura da liga antes e depois da homogeneização.

Figura 10 (a) (b) – Comparação da estrutura da liga antes e após a homogeneização



Fonte: [42].

#### 4.4.2.3. Recozimento

Este processo é aplicado geralmente em ligas trabalhadas a frio e tem como objetivo recuperar estrutura encruada proveniente dos trabalhos de conformação realizados a temperaturas menores que as de recristalização da liga.

O tratamento pode ser compreendido entre recozimento pleno e recozimento parcial, sendo que é no recozimento pleno, onde se obtém as condições máximas de plasticidade (tempera 0), que é o equivalente a recristalização total do material. O processo consiste em aquecer o metal que foi deformado a frio, geralmente na casa dos 350 °C, que é o suficiente para possibilitar o seu arranjo em uma nova configuração cristalina que não foi deformada. Esse processo de recristalização serve para remover os



efeitos do trabalho a frio e deixar o metal em uma condição dúctil. Deve atentar para não deixar ocorrer superaquecimentos, que geram coalescência e o crescimento exagerado dos grãos [40].

O recozimento parcial é realizado com temperaturas mais baixas, entre 200 °C a 280 °C, variando de acordo com a porcentagem de redução conferida na laminação a frio. Sua principal função é proporcionar uma recristalização parcial do material, promovendo assim, a obtenção de têmperas com alongamentos maiores. Este procedimento favorece a estampagem, oferecendo ao produto final uma maior resistência mecânica [37].

O recozimento leva a uma diminuição das propriedades mecânicas, resultado este que depende do estado inicial da microestrutura e da composição da liga. Assim a mesma liga, com diferentes graus de deformação, poderá apresentar propriedades radicalmente diferentes para um mesmo tratamento [38].

#### 4.4.2.4. *Alívio de Tensões*

O alívio de tensões é realizado para remover as tensões internas tanto do alumínio puro, do fundido ou de peças que foram realizadas soldas, todavia, sem recristalizar totalmente a liga. A temperatura deve ser de no máximo 340 °C e o tempo é determinado a partir da espessura ou diâmetro da peça, sendo 1 min/mm no mínimo [38].

Devido às características de transferência de calor do processo de solidificação, ocorrem fortes gradientes térmicos dentro do tarugo ou da placa vazada. Desses gradientes resultam tensões residuais intensas, que em ligas com composição química mais carregada, como as da série 7XXX, podem até fazer com que o produto vazado se rompa durante o seu resfriamento [37].

É recomendado que, neste caso, a homogeneização seja feita, o mais rápido possível, após o vazamento da peça, para que o aquecimento promova uma redistribuição das tensões residuais e a dissolução de constituintes frágeis precipitados nos contornos de grão [38].

#### 4.4.2.5. *Solubilização*

O tratamento de solubilização baseia-se no aquecimento da liga a uma temperatura suficiente alta para que ocorra a dissolução dos precipitados endurecedores. Na prática, deve-se estabelecer também uma temperatura máxima para que o aquecimento não venha causar fusão localizada de constituintes de baixo ponto de fusão presentes na liga, o que

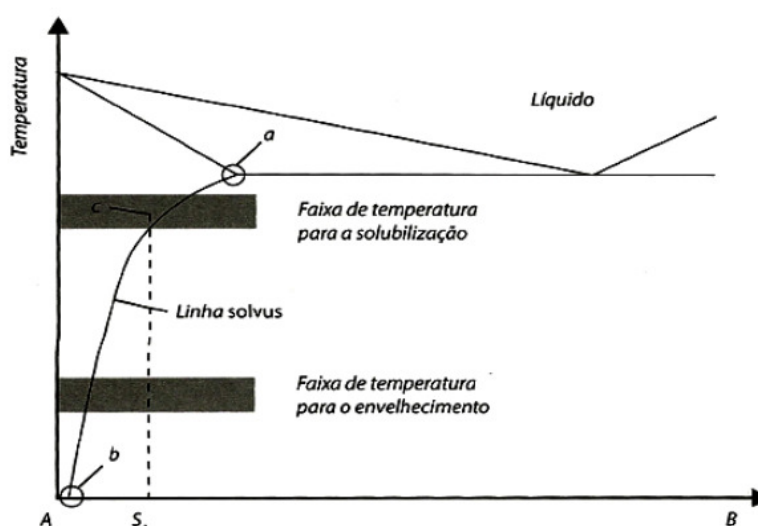
comprometeria o acabamento ou até a integridade estrutural da peça tratada, dependendo da quantidade e da distribuição desses constituintes [41].

Além disso, quanto mais alta a temperatura e mais longo o tempo de tratamento, maior a tendência para o crescimento de grãos recristalizados, o que resulta na perda de propriedades mecânicas e prejuízo do acabamento superficial do produto final. As práticas de solubilização são estabelecidas com base nessas duas temperaturas limites, considerando-se, também, a cinética das reações de dissolução de precipitados, leis de transferência de calor e as características dos fornos para a determinação dos tempos de tratamento [42].

Neste tratamento o alumínio é solubilizado em temperaturas em torno de 500 °C, durante o processo, alguns elementos de liga são redissolvidos para produzir uma solução sólida rica em soluto. O objetivo deste processo é maximizar a concentração de elementos de endurecimento, entre eles, cobre, zinco, magnésio e/ou silício na solução sólida [37].

De acordo com Freitas (2014) [38], a concentração e a taxa de dissolução desses elementos aumentam com a temperatura. Portanto, as temperaturas de solubilização são geralmente próximas à temperatura *liquidus* da liga. A Figura 11 mostra esquematicamente o diagrama de uma liga que pode ser solubilizada.

Figura 11 – Diagrama de uma liga que pode ser solubilizada



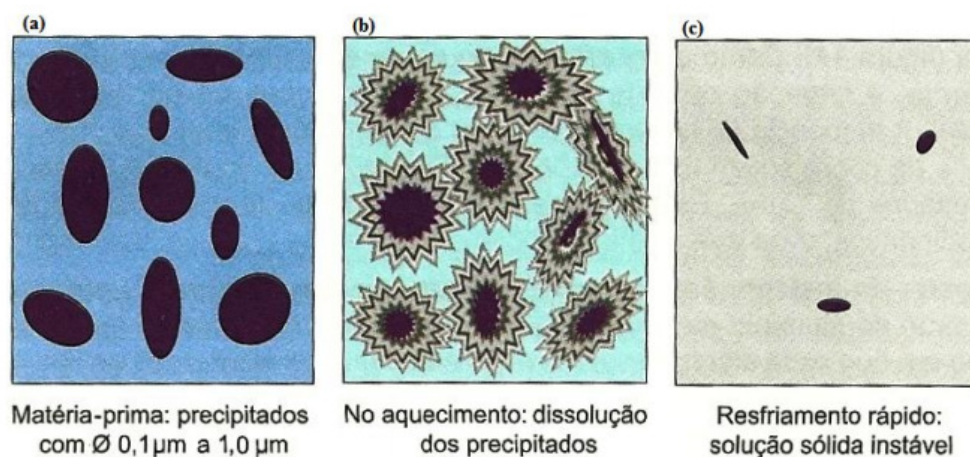
Fonte: [38].

Segundo Philipson (2002) [41], a partir do instante em que os elementos de liga ocupam as posições do reticulado do alumínio na solução sólida supersaturada, haverá

um período de tempo em que essa situação se manterá, antes que os elementos de liga comecem a ser rejeitados, com base na cinética de movimentação dos átomos, em temperaturas baixas. Em geral, esse período de incubação dura de algumas horas a alguns dias, dependendo da quantidade e do tipo do elemento de liga dissolvido.

O período de incubação pode ser prolongado mantendo-se as peças em baixa temperatura, após a solubilização (-20 °C a -15 °C), esse expediente é bastante utilizado na indústria aeronáutica, na conformação de peças fabricadas em ligas de alta resistência após solubilização, pois isso permite que um lote grande de material seja tratado de uma só vez e depois conformado à medida que for necessário, sem interferir na produtividade da operação [37]. A Figura 12 (a) (b) (c) mostra o processo de resfriamento da solubilização.

Figura 12 – Solubilização (a) matéria prima (b) aquecimento (c) resfriamento rápido



Fonte: [42]

A temperatura aplicada é diferente para cada tipo de liga que esteja sendo trabalhada, então é feito um resfriamento rápido em água, para que se possa prevenir temporariamente a precipitação dos elementos da liga. Importante também é o tempo de transferência do meio de aquecimento para o resfriamento; caso seja demorado, pode ocorrer uma solubilização incompleta, que refletirá num resultado insatisfatório [41].

O propósito do resfriamento é evitar a formação da fase de equilíbrio durante o resfriamento e a obtenção da maior quantidade possível destes elementos em solução sólida em baixa temperatura. A obtenção de alta resistência é dependente das altas taxas de extração de calor. Entretanto, a taxa de resfriamento não deve ser muito elevada. A fim de evitar distorções e tensões residuais nos componentes tratados [38].

#### 4.4.2.6. Envelhecimento

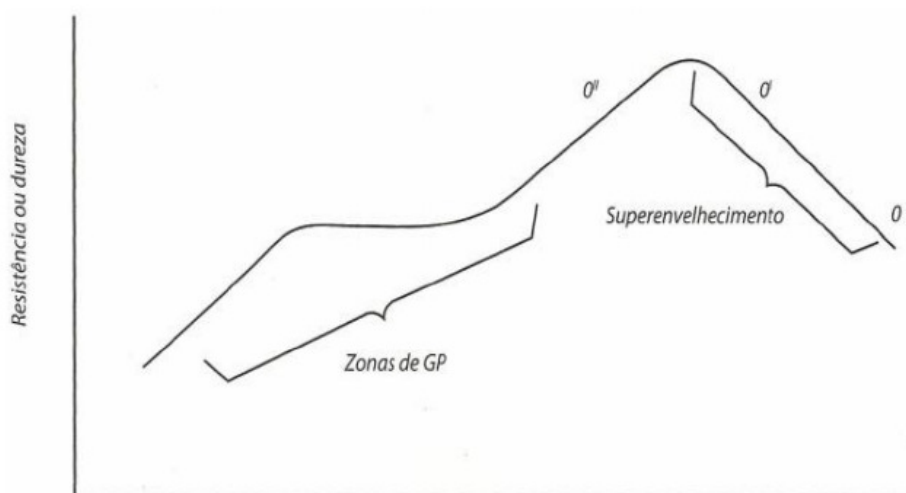
Este tratamento tem como objetivo proporcionar a precipitação de constituintes dissolvidos na matriz de solução sólida durante o tratamento de solubilização na forma de partículas muito pequenas, que proporciona o aumento da dureza do material [40]. Os requisitos principais para que ocorra o endurecimento são:

- O precipitado formado deve ser coerente com a matriz;
- A liga não deve trincar durante a operação de resfriamento na solubilização;
- Solubilidade sólida decrescente de uma fase com a queda de temperatura;
- Ter uma matriz dúctil.

Após o processo de solubilização, a liga está fora de equilíbrio, isto é, a solução sólida obtida está supersaturada com o soluto e apresenta força motriz para gerar a precipitação de outras fases durante o processo de envelhecimento. O primeiro precipitado a ser nucleado no processo de envelhecimento é chamado de zona de Guinier e Preston (GP), que é coerente com a matriz e, portanto, possui baixa energia de interface. Este precipitado minimiza a energia de deformação, adquirindo a forma de disco [43].

Quando as zonas de GP se formam, a dureza aumenta em virtude de tensões necessárias para movimentar as discordâncias através das zonas coerentes que geram a deformação e tensão no reticulado cristalino. A dureza continua a aumentar com a formação dos precipitados  $\theta''$ , porque agora as discordâncias se deslocam através de uma matriz altamente deformada pelos precipitados coerentes. Com a formação de  $\theta'$ , o espaçamento entre os precipitados torna-se maior, de maneira que as discordâncias são capazes de passar entre eles e a dureza começa a diminuir. A máxima dureza é obtida com a combinação dos precipitados  $\theta''$  e  $\theta'$ . Com mais tempo no envelhecimento, a distância entre os precipitados aumenta, fazendo com que as contornem mais facilmente e a dureza diminua [37]. A Figura 13 mostra esse mecanismo.

Figura 13 – Influência do tempo de envelhecimento sobre a dureza



Fonte: [38].

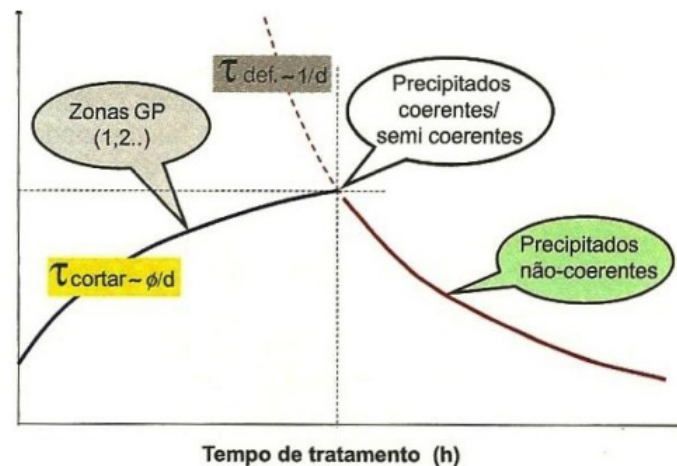
O endurecimento por envelhecimento ocorre porque existe interação entre os campos de tensão associados às discordâncias e aos precipitados (assim como existe uma atração magnética entre um ímã e uma peça de aço). De uma forma ou de outra existe uma “neutralização” dos efeitos dos campos de tensão entre discordância e precipitado, o que diminui a energia interna do sistema [37].

No início do envelhecimento ocorre a migração progressiva dos elementos de liga em solução sólida para zonas GP e para os precipitados. A fração volumétrica de precipitados aumenta com o tempo de tratamento e, quanto mais “carregada” a liga, maior a quantidade de precipitados formados [41].

Uma vez que quase todo o elemento de liga está fora da solução sólida, a fração volumétrica de precipitados permanece constante, após isso os precipitados menores irão se dissolver, “alimentando” os maiores. Isso diminui a quantidade de precipitados por unidade de volume e aumenta a distância entre eles.

De acordo com Freitas (2014) [38], a partir da associação desses dois processos durante o tratamento do material, chega-se à configuração simplificada da curva de envelhecimento que se conhece na figura 14 a seguir.

Figura 14 – Evolução da forma dos precipitados x tempo (curva de envelhecimento)



Fonte: [42].

Do início do tratamento até o pico de dureza, o mecanismo predominante é o de “corte de precipitados”. Como o número de precipitados por unidade de volume aumenta e eles estão muito próximos, a tensão para “curvar” as discordâncias é mais alta do que para “cortá-las”, com o aumento da fração de precipitados ocorrerá um endurecimento progressivo, até que a maior parte dos elementos de liga esteja combinada na forma de precipitados [43].

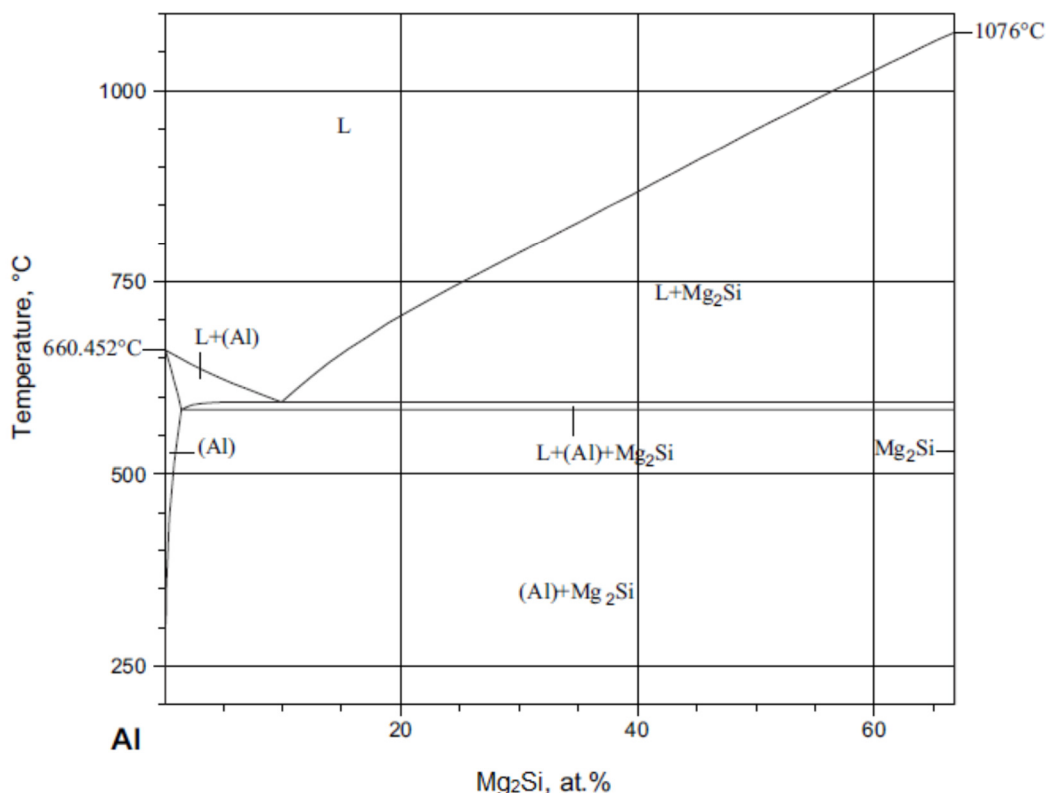
No pico de dureza em diante ocorre a formação de precipitados não coerentes em função da dissolução dos coerentes. Nesse ponto passa a predominar o mecanismo em que as discordâncias passam a se “curvar” entre dois precipitados e passar por eles, com a formação de um anel de discordância ao redor dos precipitados. Esse mecanismo passa a ser predominante e, como nesse estágio do tratamento a distância entre precipitados aumenta progressivamente, ocorre o amolecimento do material, causado pelo sobre envelhecimento [38].

#### 4.4.3. Ligas Al-Mg-Si

Ligas Al-Mg-Si apresentam boa conformabilidade, boa resistência à corrosão e boa soldabilidade [44]. Segundo IADS, ligas dessa série apresentam composição de Mg e Si nas faixas de 0,6-1,2% e 0,4-1,3%, respectivamente. São ligas tratáveis termicamente com formação do composto intermetálico,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ . Em peças fundidas/lingotadas de ligas de série 6XXX, a combinação de taxa de resfriamento e composição química local pode ocasionar diferentes arranjos microestruturais constituídos de fases de equilíbrio e intermetálicos estáveis e metaestáveis [45].

Ligas de Al-Mg-Si são formadas por 2 constituintes principais, a da matriz de Al e a do composto intermetálico,  $Mg_2Si$ . Mostra-se o diagrama de fases em equilíbrio dessa liga na Figura 15.

Figura 15 – Diagrama de fases em equilíbrio de uma liga Al-Mg-Si



Fonte: adaptado de [46].

No diagrama, nota-se uma região ternária, onde ligas dessa série apresentam a constituinte líquida da liga (L), a fase  $\alpha$  (rica em Al com átomos de  $Mg_2Si$  dissolvidos) e a fase  $\beta$  (rica em  $Mg_2Si$  com átomos de Al dissolvidos). O ponto pseudoeutético se localiza, aproximadamente, à 595 °C e com 13-14% do composto  $Mg_2Si$  na composição da liga [47]. O  $Mg_2Si$  tem massa específica de 1,88 g/cm<sup>3</sup> e a formação desse intermetálico é importante, pois aumenta a resistência mecânica da liga [48]. A solubilidade máxima do  $Mg_2Si$  é de 1,85% no alumínio [49]. Além disso, a fase  $Mg_2Si$  é um composto de estrutura cúbica de face centrada (CFC) com 12 átomos/célula unitária e seu ponto de fusão é de 1087 °C [50].

Nas ligas de série 6XXX, a rejeição de soluto (Mg e Si) durante a solidificação induz um líquido interdendrítico mais denso próximo às interfaces de solidificação.

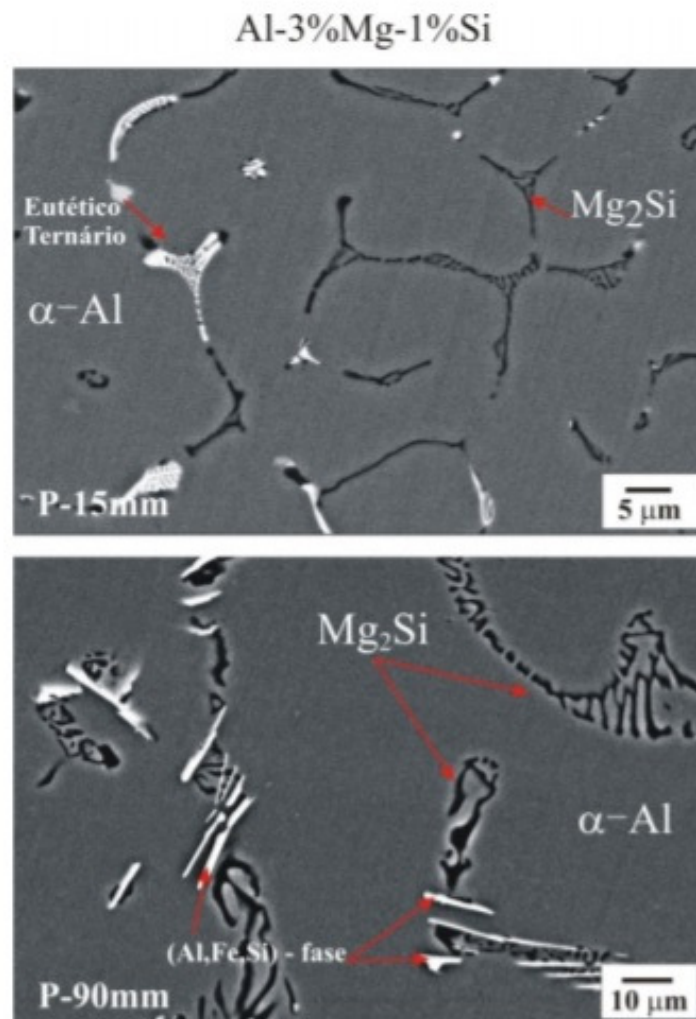
Ainda, em situações onde a solidificação acontece em moldes permanentes de aço, há a tendência de difusão de ferro, Fe. Esse teor de Fe pode provocar a formação de intermetálicos Al-Fe e Al-Fe-Si [45].

O teor de Mg em ligas Al-Mg-Si tem forte influência na formação de microestruturas de solidificação, onde o aumento de Mg favorece o aumento do teor de  $Mg_2Si$ . Observaram, ainda, que a presença de segregação de Fe para a zona final de solidificação favoreceu a formação de intermetálicos complexos (Al-Fe-Mg-Si) [51].

Na solidificação de ligas multicomponentes fora do equilíbrio, pode ocorrer a formação de fases de todos elementos presentes. Analisando os diagramas de fases de sistemas ternários, verifica-se que a adição de um terceiro elemento muda a formação das fases no processo de solidificação. Nesses sistemas, podem ocorrer condições termodinâmicas associadas à interdifusão de soluto que propicia, assim, a formação de fases secundárias e intermetálicas. A formação das fases primárias e secundárias são facilitadas quando se há uma maior concentração de soluto, isto é, em regiões com menores velocidades de transformação e taxas de resfriamento. A formação das fases tem a tendência de ocorrer nos contornos de grão [45]. Mostra-se na Figura 16, duas análises de EDS feitas em MEV para uma liga Al-Mg-Si de diferentes distâncias até o molde de vazamento da liga, onde se evidencia uma maior formação de fases secundárias em posições mais distantes do molde.



Figura 16 – Imagens de MEV (elétrons retroespalhados) evidenciando a morfologia das fases intermetálicas de uma liga AL-3%Mg-1%Si para diferentes distâncias até o molde (15 e 90 mm)



Fonte: [45].

#### 4.4.4. Ligas de Alumínio 6201

A grande maioria das linhas de transmissão de energia elétrica é feita de materiais não homogêneos. Tipicamente, estas são feitas de um material central de alta resistência, envolto por um material de alta condutividade. O tipo mais comum de condutor é o condutor feito com uma alma de aço envolto por cabos de alumínio. *Aluminium Conductor Steel Reinforced* (ACSR). Mais recentemente, o condutor homogêneo *All-Aluminium Alloy Conductor* (AAAC), tem se tornado bem popular. Estes condutores são

feitos de ligas tratáveis termicamente do sistema Al-Mg-Si [20]. Estas ligas são conhecidas como 6201 e 6101.

Segundo a A.A. (*The Aluminum Association*) [21], as faixas permitidas para as ligas 6101 e 6201 se encontram na Tabela 3, abaixo:

Tabela 3 – Faixa química para as ligas 6101 e 6201 USA, (porcentagem em peso).

	%Mg	%Si	%Fe	Cu	Mn	Cr	B	O.C.*	O.T.**
6101 USA	0,35 a 0,8	0,30 a 0,7	0,50 máx	0,10 máx	0,03 máx	0,03 máx	0,06 máx	0,03 máx	0,10 máx
6201 USA	0,6 a 0,9	0,50 a 0,9	0,50 máx	0,10 máx	0,03 máx	0,03 máx	0,06 máx	0,03 máx	0,10 máx

\*O.C. = Outros Cada; \*\*O.T. = Outros Total

Fonte: [21].

A liga 6201 é normalmente mais utilizada em cabos de condução de alumínio liga (AAAC), onde substituem os condutores de alumínio com alma de aço (ACSR). A solubilidade (dessa liga em específico) do intermetálico  $Mg_2Si$  ocorre à  $510^{\circ}C$ . Além disso, a liga pode ser reforçada pela precipitação do  $Mg_2Si$ , caso envelhecida à  $150^{\circ}C$  por 4 horas [52].

A liga 6201, que é utilizada nesse estudo, apresenta composição, em acordo com a *American Society of Metals*, mostrada na Tabela 4.

Tabela 4 – Composição da liga de alumínio 6201

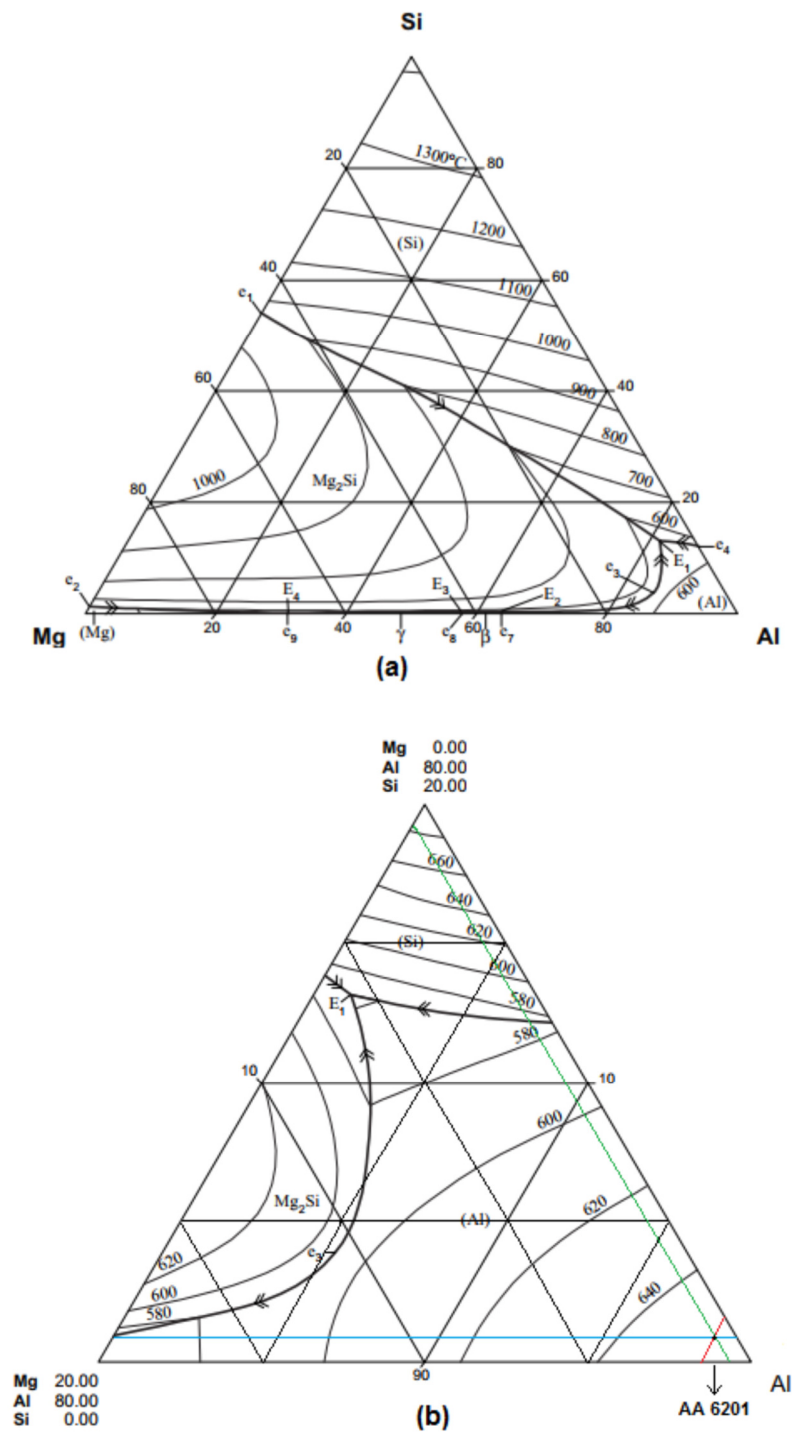
Elemento	Composição (%)
<b>Si</b>	0,5 – 0,95
<b>Mg</b>	0,6 – 0,9
<b>Fe</b>	0,5 (máx)
<b>Cu</b>	0,1 (máx)
<b>Mn</b>	0,03 (máx)
<b>Cr</b>	0,03 (máx)
<b>Al</b>	Restante

Fonte: [53].

O diagrama ternário de ligas de série 6XXX é mostrado na Figura 17a. Nos três eixos é indicada a proporção, em peso, de cada elemento presente no material e as curvas

representadas representam as isotermas *liquidus*. Ampliando a parte inferior direita do diagrama ternário e inserindo concentrações médias de Al, Mg e Si presentes na liga 6201 (mostrados na Tabela 4), pode-se estimar a temperatura da isoterma *liquidus* dessa liga.

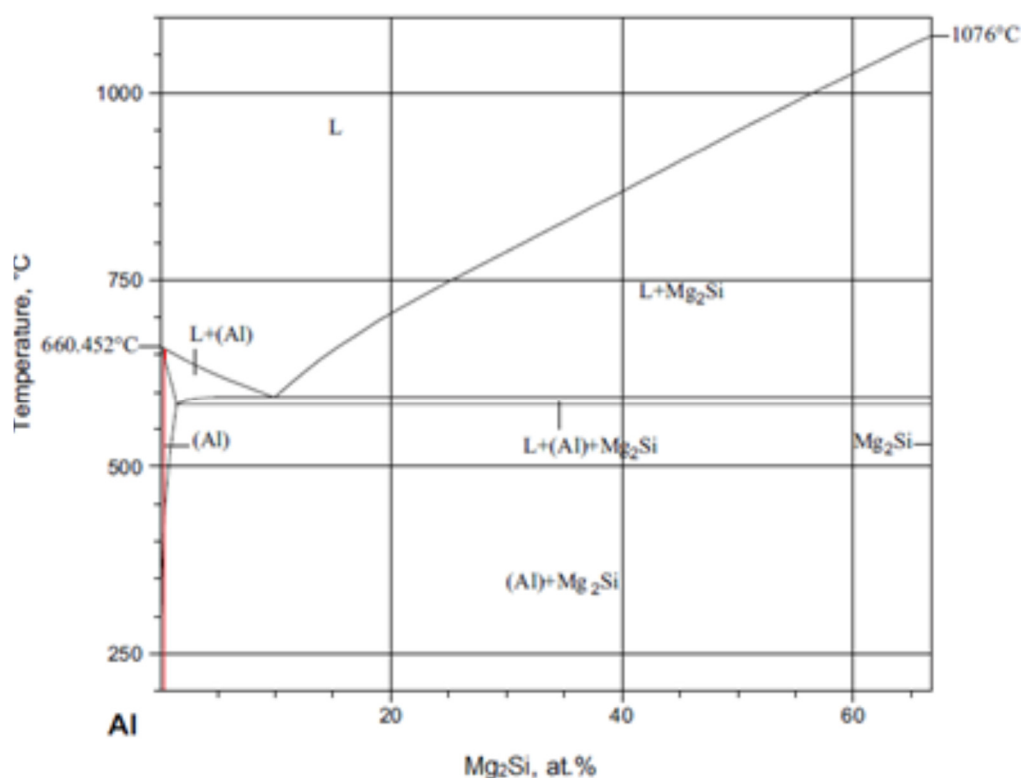
Figura 17 – Diagrama ternário de ligas Al-Mg-Si (a) e ampliação (b) do canto inferior direito com concentrações da liga AA6201.



Fonte: adaptado de [46].

A partir da análise da Figura 17b, pode-se avaliar que a temperatura de transformação *liquidus* de ligas 6201 é da ordem de 655-660 °C. Inserindo a temperatura da isoterma *liquidus* no diagrama de fases da Figura 15, pode-se estimar que a concentração do composto intermetálico gira em torno de 1,5% em percentual de massa dessa liga, conforme demonstrado na figura 18. Embora haja outro ponto sobre a *liquidus* que apresente o mesmo ponto de solidificação, espera-se uma baixa concentração de  $Mg_2Si$ , então o ponto é o mais à esquerda no gráfico.

Figura 18 – Diagrama de fases da liga destacando a temperatura *liquidus*.



Fonte: adaptado de [46].

Portanto, a liga 6201 não se encontra próxima da região pseudoeutética da liga, tendo a tendência de não se formar estruturas pseudoeutéticas caso seja solidificada em condições de equilíbrio.

## 4.5. Condutores

### 4.5.1. Padronização de Dimensões de Fios e Cabos

Os condutores empregados em linhas aéreas de transmissão e distribuição são constituídos por cabos, obtidos pelo encordoamento de fios metálicos. Sobre um fio de seção transversal circular são enrolados, em forma espiral, outros fios envolvendo-o, formando uma, duas ou mais camadas. O sentido de enrolamento de cada uma das camadas é sempre oposto ao da camada anterior. A camada mais externa é torcida para a direita. Os fios que compõem um cabo podem ser todos de um mesmo diâmetro, caso mais comum, ou podem possuir diâmetros diferentes em camadas diferentes [22]. Podem ser de materiais diferentes, desde que compatíveis eletroliticamente entre si. A relação entre o número de camadas e a quantidade de fios, para cabos formados por fios cilíndricos de mesmo diâmetro, é dada pela equação:  $n=3x^2+3x+1$ , onde,  $n$  é o número total de fios e  $x$  é o número de camadas ou capas.

Assim:

1 camada, 7 fios;

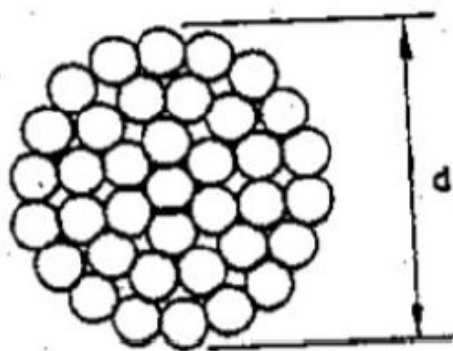
2 camadas, 19 fios;

3 camadas, 37 fios;

4 camadas, 61 fios, etc.

Os cabos são especificados pelo seu diâmetro nominal, área de sua seção transversal nominal, o número de fios componentes e pelos metais ou ligas com que são confeccionados. O diâmetro nominal do cabo é o diâmetro do círculo que tangencia a geratriz externa dos fios componentes da camada externa, conforme mostrado na figura 19. A área de seção transversal é determinada pela soma das áreas das seções transversais dos fios componentes.

Figura 19 – Diâmetro nominal ( $d_n$ ) de um cabo com 3 camadas (37 fios)



Fonte: [22].

O número de diâmetros de fios e a variedade de cabos que podem ser obtidos é praticamente ilimitado. Para restringir essa variedade a um número econômica e teoricamente aceitável, foi estabelecido padrão de medidas e composições [22]. No Brasil foi adotado em todas as normas que tratam sobre cabos nus da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), tanto para fios e cabos de cobre quanto para os de alumínio e ligas de alumínio, a escala hoje conhecida como AWG (*American Wire Gage*), pela qual se estabeleceram inicialmente 40 tamanhos padronizados de cabos, ordenados em ordem decrescente de diâmetro e mantendo uma relação constante entre os diâmetros de dois tamanhos sucessivos. O maior diâmetro escolhido foi de 0,01168 m (0,4600") e que recebeu a designação 0000. O menor diâmetro, com 0,000127 m (0,005") recebeu o número 36. Então, entre 0000 e 36 existem 38 diâmetros padronizados.

Também adotada pela ABNT, a unidade de área usada para definir a seção transversal dos condutores é o CM (Circular Mil), que corresponde à área de um círculo cujo diâmetro é de um milésimo de polegada, ou seja,  $0,506707 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$ . O condutor 0000 tem uma seção transversal de 211.600 CM ou 211,6 kCM e o condutor número 36, 25CM.

#### 4.5.2. Tipos de Cabos Condutores de Redes Aéreas

O alumínio na sua liga 1350 é hoje inteiramente dominante para a fabricação de condutores para redes aéreas de transmissão e distribuição de energia elétrica, tanto em sua forma pura, como em liga com outros elementos associados com o aço. A condutividade do alumínio liga 1350 é cerca de 61% daquela do cobre usado para cabos (61% IACS – International Annealed Copper Standard). Entretanto, devido ao seu baixo

peso específico, a condutividade por unidade de peso do cobre é mais que o dobro se comparado ao alumínio. A resistência mecânica do alumínio é metade daquela do cobre. Através da utilização de outras ligas de alumínio ou da associação com o aço, é possível sanar este problema [22].

Tanto os fios de alumínio como os de suas ligas sofrem um processo de oxidação que recobre os fios com um filme de pequena espessura. Esse filme é bastante duro e estável, protegendo o fio contra futuras agressões externas. Diversas ligas de alumínio são indicadas para ambientes de atmosferas marítimas ou mesmo de atmosferas bastante agressivas.

Por fim, vale ressaltar que seu preço por unidade de peso é bem baixo, sendo cerca de metade do preço da unidade do cobre. Conclui-se, então, que o investimento necessário em cabos para transportar uma mesma corrente, com o mesmo rendimento em condutor de alumínio, é cerca de um quarto daquela necessária à sua realização por condutor de cobre. Os tipos de cabos de alumínio e suas ligas mais utilizadas em redes aéreas são:

Cabo de alumínio nu (CA, em inglês: AAC);

Cabo de alumínio nu com alma de aço (CAA, em inglês: ACSR);

Cabos de liga de alumínio (CAL, em inglês: AAAC);

Cabos de alumínio com alma de liga de alumínio (CALA, em inglês: ACAR).

Os cabos CA são confeccionados com fios de pureza de 99,45% e têmpera dura (liga 1350). Sua fabricação obedece no Brasil à norma ABNT NBR 07271 [24]. Estes cabos devem ser especificados pela área de sua seção transversal em mm<sup>2</sup> e pelo número de fios que os compõe. Pode-se usar subsidiariamente o número correspondente à área em CM, sem indicação da unidade. As indústrias produtoras empregam uma palavra código para a sua identificação. Cada um dos cabos CA é designado pelo nome de uma flor no idioma inglês. Por exemplo, cabo CA 477 kCM, código Cosmos, seção 241,51mm<sup>2</sup>, com 19 fios de alumínio [23].

Os cabos CAA são idealizados para suprir a falta de resistência mecânica à tração dos cabos CA. Em torno de uma “alma” constituída por um fio ou por um cabo composto por 7 fios, 19 fios ou mesmo mais fios de aço galvanizado, são enrolados uma, duas ou mais camadas ou coroas concêntricas de fios de alumínio do mesmo tipo usado nos cabos CA. Nos cálculos elétricos, considera-se que os fios de aço não participam da condução das correntes elétricas, tendo apenas função mecânica. No Brasil, os cabos CAA devem ser especificados de forma semelhante aos cabos CA, incluindo a classe de galvanização da alma de aço, sendo estas divididas em 3 categorias: Classe A, B e C. Sua fabricação

obedece à norma ABNT NBR 07270. As palavras código utilizada na identificação dos cabos CAA vêm do nome de aves, também em inglês. Têm-se como exemplo o cabo CAA 477 kCM, código Hawk, seção de 280,85mm<sup>2</sup>, com 26 fios de alumínio e 7 de aço [23].

A fim de aumentar a resistência mecânica à tração e a estabilidade química do alumínio, recorre-se à adição de diversos elementos de liga como o ferro, cobre, silício, magnésio, manganês, zinco, etc, formando ligas como 6201, com cerca de 52,5% IACS. Dessa forma, empregam-se fios com essas ligas de alumínio, encordoados da forma convencional, sendo os cabos que contenham apenas fios com a liga 6201 designados no Brasil por CAL. Esses são especificados pelo tipo de liga, sua área em kCM ou mm<sup>2</sup>, número de fios e seu diâmetro nominal. Sua fabricação obedece à norma ABNT NBR 10298. Por exemplo, o cabo CAL 559,5 kCM, código Darien, seção de 283,54 mm<sup>2</sup>, com 19 fios, equivale ao cabo CA ou CAA 477 kCM [23].

Além do encordoamento, os fios de liga de alumínio também são usados como alma para os cabos, constituindo um cabo central, sobre o qual são enrolados os fios de alumínio. Este cabo é designado abreviadamente por CALA. Na primeira camada sobre a alma pode haver fios de alumínio 1350 e de liga 6201. Nas camadas externas há apenas fios de alumínio 1350, dependendo da relação entre o número de fios de liga e o de alumínio. Os cabos CALA são especificados da mesma forma que os cabos CAL, pela NBR 10298. Um exemplo de cabo é o CALA 1000 kCM, seção 506,77 mm<sup>2</sup>, com 18 fios de alumínio liga 1350 e 19 fios de alumínio liga 6201 [23].

#### 4.5.3. O Uso da Liga 6201 na Fabricação de Cabos Condutores

Há mais de 80 anos o tipo de condutor mais utilizado em linhas de transmissão aéreas é do tipo ACSR, *Aluminium Conductor Steel Reinforced* (cabo de alumínio com alma de aço). Esse tipo de cabo une a altíssima condutividade do alumínio à excelente resistência mecânica do aço, que permite que a sustentabilidade de linhas compridas, algo que não seria possível caso fosse fabricada inteiramente em alumínio. A aplicação de condutores inteiramente de alumínio era possível apenas em linhas que possuísem as torres de suporte muito próximas umas das outras, o que encarecia bastante o projeto. Distâncias excessivas entre as torres causavam o rompimento precoce dos cabos [54].

O aço apresenta baixa condutividade, quando comparado ao alumínio, e por isso gera uma diminuição na quantidade energia que poderia ser transmitida por uma seção



transversal idêntica do cabo inteiramente em alumínio. Geralmente, para corrigir esse problema, mais camadas de alumínio são adicionadas às de aço, tornando os condutores demasiadamente pesados e espessos.

No século passado havia um grande interesse no desenvolvimento de alguma liga que pudesse ser utilizada para fabricar cabos que não necessitassem do aço. Durante esses esforços a liga 6201 foi desenvolvida e apareceu como uma grande solução para o problema dos ACSR. Há cerca de 30 anos os condutores fabricados inteiramente em alumínio liga começaram a se tornar bastante populares [54].

Segundo o Catálogo da Nexans (2013) [23], a liga 6201 não conduz eletricidade tão bem quanto o alumínio 1350 (o cabo de alumínio 1350 possui 60% da condutividade do cobre puro enquanto a liga 6201 possui cerca de 52,5%), mas apresenta cerca do dobro da resistência mecânica, o que possibilita que ele resista aos esforços solicitados pela linha durante sua vida em operação. Um antigo problema de corrosão que os cabos ACSR apresentavam foi resolvido ao utilizar condutores feitos de material homogêneo. A liga 6201 pode, ainda, ter sua condutibilidade aumentada, em detrimento de sua resistência, e vice-versa, o que garante um elevado grau de versatilidade a essa liga [55].

A liga 6201, apesar de toda a euforia que causou com os primeiros anos de sua implementação, não foi capaz de resolver o problema por completo. As primeiras linhas que utilizaram o condutor de liga 6201 começaram a colapsar antes do final previsto para os cabos, causando enormes prejuízos e transtornos. Inicialmente, pouco se sabia sobre o motivo que acarretavam essas falhas. Porém, com contínua pesquisa na área, hoje se entende que o principal problema que acomete essas linhas é a fadiga por *fretting*, causada pela vibração oriunda das correntes de vento. Diversos estudos estão sendo continuamente realizados para caracterizar melhor esse tipo de falha [54].

#### 4.5.4. Vantagens De Cabos Condutores Com Liga 6201.

As vantagens dos cabos AAAC sobre os ACSR são [20]:

- Maior resistência mecânica por peso;
- Possibilidade do uso de estruturas mais leves e torres mais distantes;
- Menor resistência elétrica e melhor taxa de corrente do que o tamanho equivalente de ACSR;
- Maior dureza superficial, e consequente, menor probabilidade de danos superficiais durante o manuseio;

- Melhor performance a corrosão;
- Alta resistência à fluência.

Além das propriedades acima, os condutores AAAC podem reduzir os custos da perda elétrica, conforme dados contidos na Tabela 5, abaixo:

Tabela 5 – Economia de energia condutores ACSR versus AAAC.

	ACSR	AAAC
Corrente (I)	350 amp	350 amp
A.C. Resistência a 50°C	0,177 ohm/km	0,102 ohm/km
Fator de carregamento (Load factor) (LF)	0,5	0,5
Fator de perda de carregamento (Load loss factor) (LLF)	0,2875	0,2875
Potência de perda (PL) $I^2 \times LLF \times 0,001$	6,23 KW/km	3,59 KW/km

Fonte: [20].

## **5. MATERIAIS E MÉTODOS**

A metodologia experimental utilizada neste trabalho desenvolveu-se fundamentalmente na possibilidade de se caracterizar diferentes amostras de cabo condutor elétrico, liga 6201, obtida de locais com diferentes distâncias em relação à orla marítima, investigando a relação entre os níveis de degradação do material com os locais de onde as amostras foram obtidas.

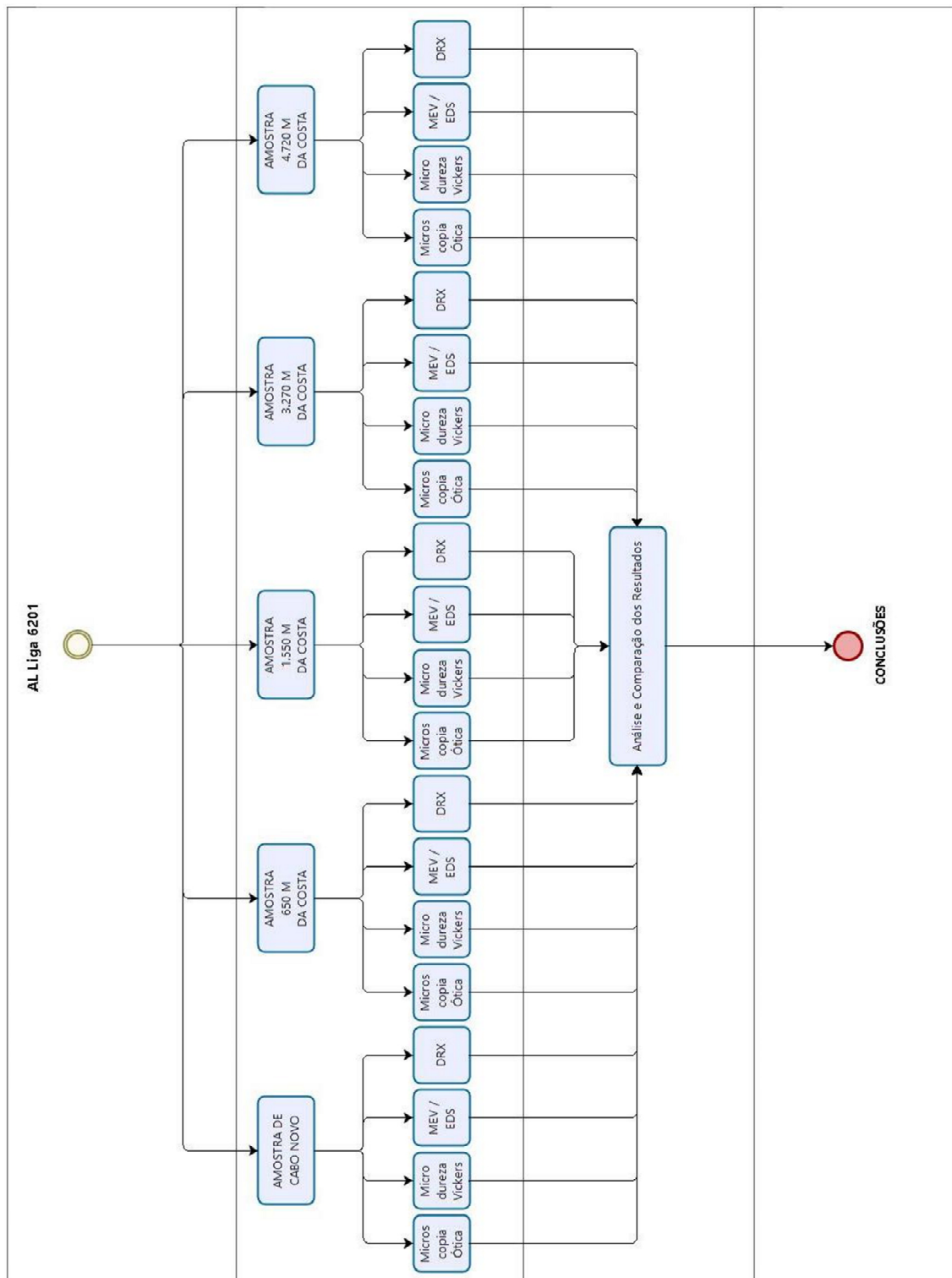
A partir das 5 amostras disponíveis, foram realizados os seguintes ensaios:

- Microscopia ótica;
- Microdureza Vickers;
- MEV/EDS
- DRX

Após todos os resultados estarem disponíveis, foi feita a análise comparativa entre as amostras, em busca de evidências que possibilitassem determinar se houve degradação ou alterações das propriedades originais de forma diferente entre as amostras.

A figura 20 apresenta em forma de fluxograma, a sequência de ensaios que foram realizados com as diferentes amostras do material.

Figura 20 – Fluxograma de desenvolvimento dos ensaios



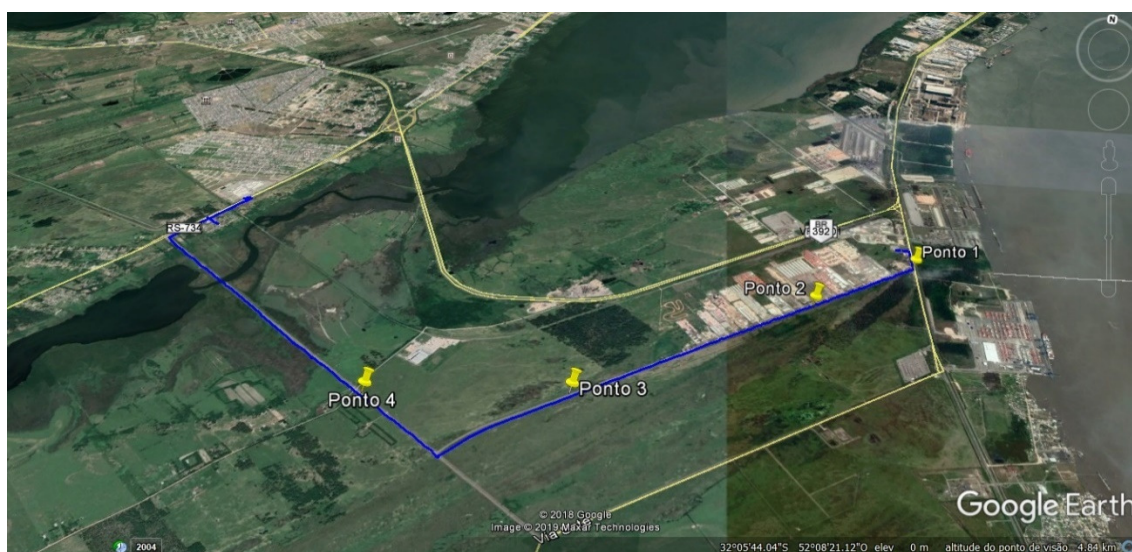
Fonte: Próprio autor.

## 5.1. Região de Estudo

As amostras de material a serem analisadas foram obtidas de uma rede de distribuição de energia elétrica, que opera na classe de tensão 13,8 kV, localizada no distrito industrial do município de Rio Grande – RS, próximo à região de orla marítima do balneário Cassino, cujo ambiente é característico por apresentar poluição atmosférica por cloretos, bem como outros gases poluentes emitidos pela indústria de fertilizantes e refino de petróleo, características que tornam a região uma das mais hostis, no que diz respeito à degradação de materiais expostos às intempéries.

A figura 21 apresenta a ilustração do traçado da rede elétrica construída com o material condutor elétrico objeto deste estudo, bem como a indicação dos pontos onde as amostras foram coletadas.

Figura 21 – Mapa da região de estudo com indicação dos pontos de coleta das amostras



Fonte: próprio autor.

As regiões litorâneas de sua área de concessão são classificadas pela área de padronização técnica da Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica, como regiões de orla marítima, para as quais as normativas internas preveem a utilização de materiais especiais como ferragens em ligas de Alumínio e condutores de cobre, devido ao seu melhor desempenho e durabilidade neste tipo de ambiente.

A obra de construção da rede elétrica da qual foi obtido o material em estudo, surgiu da necessidade de atendimento à demanda por energia elétrica de um empreendimento comercial, a ser instalado nas proximidades do Trevo de acesso ao

município de Rio Grande, para o qual os estudos elétricos indicaram a necessidade de construção de um circuito exclusivo de média tensão, devido à sua elevada carga projetada. No entanto, tendo em vista a necessidade de construção desta rede no traçado proposto, a pouca urbanização no seu entorno bem como o elevado índice de ocorrências de vandalismo e furto de condutores de cobre nesta região, causando interrupções imprevistas no fornecimento de energia elétrica bem como a aplicação de penalidades à Companhia por violação dos indicadores técnicos de continuidade, tornava-se necessária a utilização de outro tipo de material, que garantisse o desempenho elétrico requerido e que não fosse tão atrativo para as ações de vandalismo.

Historicamente, as áreas de projetos da Companhia evitavam a utilização de condutores convencionais de alumínio da série 1xxx, em regiões de orla marítima, devido à sua significativa degradação nestes ambientes e menor resistência mecânica, quando comparada com condutores de cobre. Uma alternativa seria a utilização de condutores de alumínio com alma de aço, CAA, no entanto, sua aplicação em regiões de orla marítima também não é indicada devido à degradação acelerada da camada de zinco que recobre a alma de aço do em contato com o alumínio condutor.

Portanto, foi proposto para este projeto a utilização de condutores de Alumínio, liga 6201, denominado CAL, bitola 350 MCM. Embora seja um material com relativa utilização por diversas concessionárias de energia elétrica no país, sua implantação na área de concessão da CEEE D ainda não havia sido adotada, e seu comportamento sob ação das diversas atmosferas existentes na região de atuação da Companhia ainda é desconhecida, sendo recomendado o monitoramento e avaliação de seu desempenho periodicamente.

## **5.2. Material de Estudo**

As amostras estudadas neste trabalho foram todas compostas pelo mesmo tipo de material, sendo um cabo condutor de energia elétrica, de alumínio liga 6201, denominado CAL, de bitola 350 MCM.

Foram selecionadas 5 amostras do mesmo material, cuja descrição de cada ponto é apresentada a seguir:

Amostra cabo novo: faz referência a uma amostra obtida de um cabo novo, sem utilização nem exposição às condições ambientais, retirada de uma bobina do estoque, depositada no armazém;

Amostra com 650 m da costa: refere-se ao ponto em que supostamente o material analisado teria sido exposto à maior degradação, localizado no ponto de coordenadas 32° 7'9.50"S, 52° 6'41.41"O, submetido a um ciclo de 17.550 horas de exposição ininterruptas aos agentes ambientais diversos, tais como cloretos, gases e partículas sedimentáveis, característicos da região. Trata-se da amostra em que é esperada a maior degradação do material.

Amostra com 1.550 m da costa: obtida de um ponto com exposição intermediária, localizado nas coordenadas 32° 7'29.20"S, 52° 7'14.43"O.

Amostra com 3.270 m da costa: também obtida através de um ponto intermediário, porém mais afastado da região considerada mais crítica, do que a amostra do ponto à 1.550 m, de coordenadas 32° 8'9.26"S, 52° 8'22.86"O.

Amostra com 4.720 m da costa: obtida de ponto com localização mais afastada da região considerada crítica. É a amostra para a qual é esperado que os estudos indiquem as menores taxas de degradação do material, cujas coordenadas são 32° 8'14.83"S, 52° 9'18.91"O.

As amostras à 1.550, 3.270 e 4720 m, assim como a amostra obtida à 650 m da costa, também estiveram expostas a um ciclo contínuo de 17.550 h, submetidas permanentemente à circulação de corrente elétrica bem como as ações causadas pelas intempéries.

A definição dos pontos para retirada das amostras se deu a partir da análise de postes com relativo distanciamento entre si e nos quais os cabos fossem ancorados para ambos os lados, ou seja, que a rede fosse mecanicamente independente em cada lado do poste. Em postes com esta configuração, a conexão entre a entrada e a saída da rede é feita por uma emenda de cabo, sem tração, de forma que nesses pontos a atividade poderia ser executada de maneira mais segura.

A retirada efetiva das amostras foi feita com a rede energizada, para que não houvesse prejuízo ao cliente nem aos indicadores de continuidade da CEEE Distribuição, com o uso da técnica de Linha Viva, através da qual é possível executar a substituição de postes e estruturas sem interromper o fornecimento de energia ao cliente.

A Tabela 6 apresenta de forma reunida as coordenadas geográficas dos pontos de onde foram obtidas as amostras de campo, bem como os raios de cada ponto em relação à orla marítima.

Tabela 6 – Coordenadas Geográficas dos pontos estudados

PONTO	LATITUDE	LONGITUDE	RAIO EM RELAÇÃO À COSTA [m]
1	32° 7'9.50"S	52° 6'41.41"O	650
2	32° 7'29.20"S	52° 7'14.43"O	1.550
3	32° 8'9.26"S	52° 8'22.86"O	3.270
4	32° 8'14.83"S	52° 9'18.91"O	4.720

Fonte: Próprio Autor.

Nas figuras 22 a 25, estão representados os 4 pontos de onde foram obtidas as amostras sujeitas à degradação, com a representação de seus raios até a orla marítima.

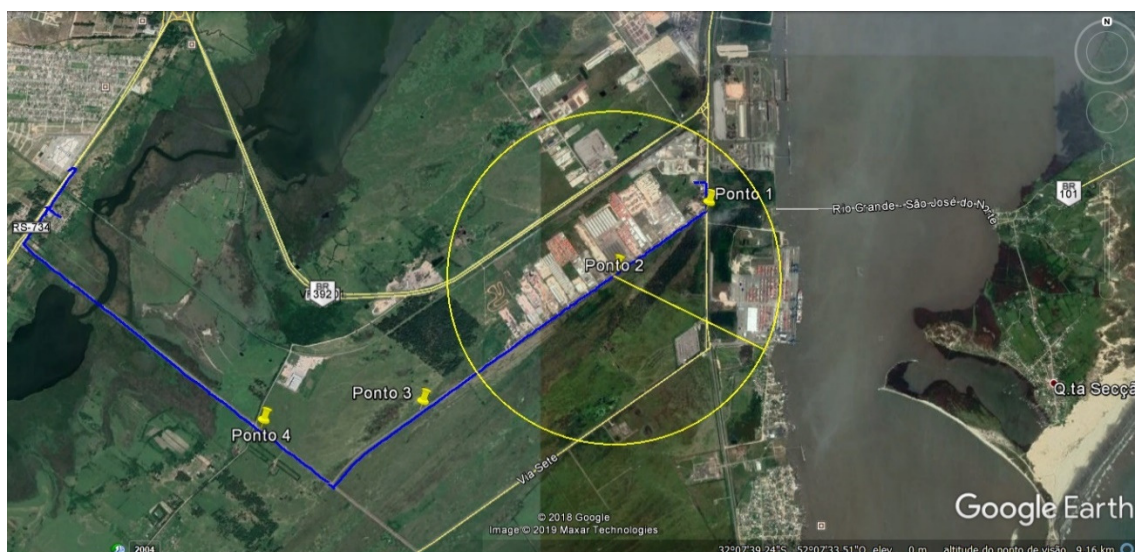
Figura 22 – Representação do Ponto 1, com raio de 650m em relação à costa



Fonte: próprio autor.

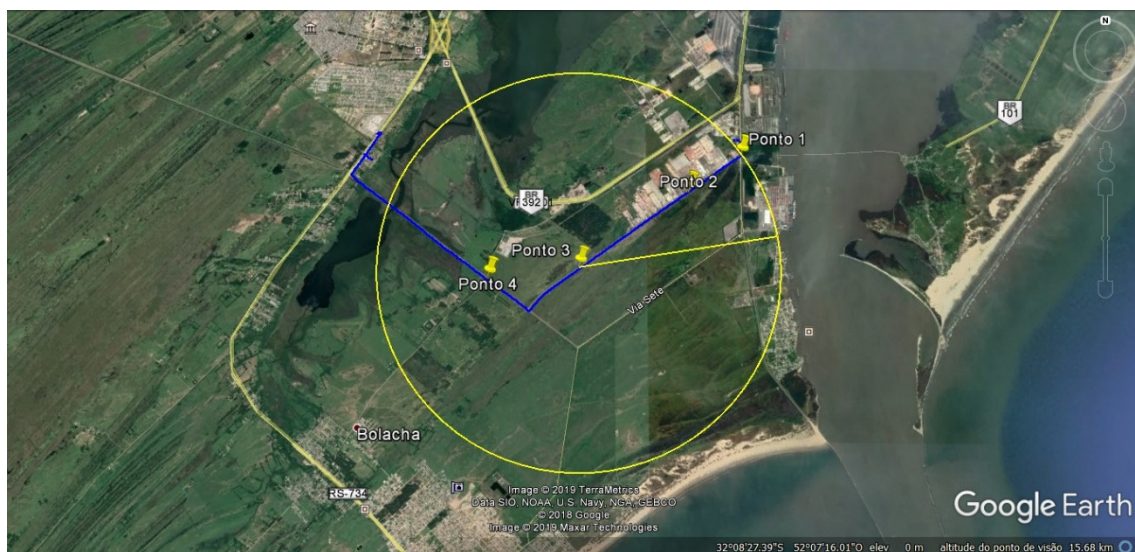


Figura 23 – Representação do Ponto 2, com raio de 1.550 m em relação à costa



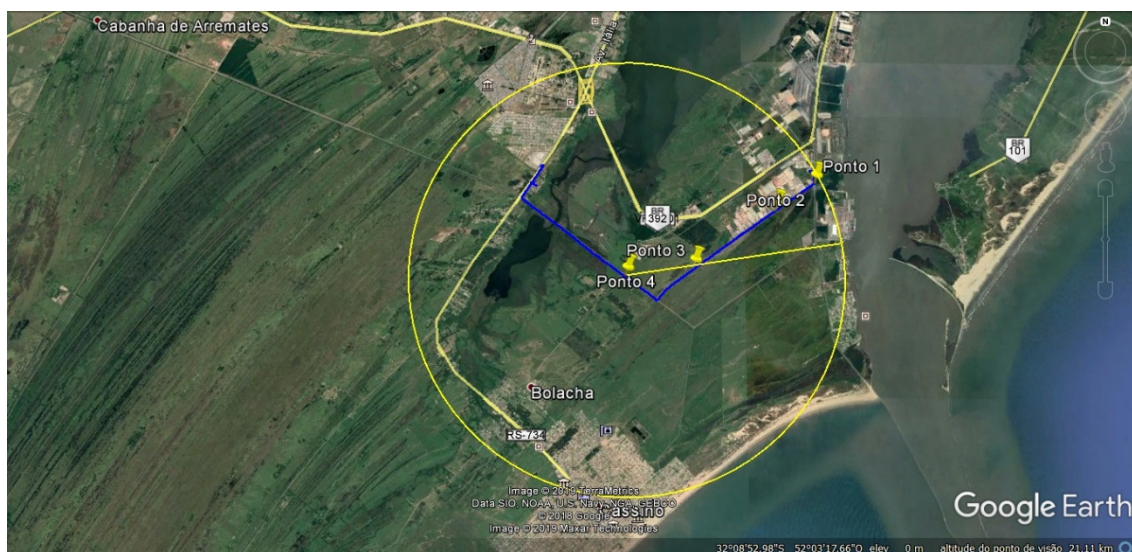
Fonte: próprio autor.

Figura 24 – Representação do Ponto 3, com raio de 3.270 m em relação à costa



Fonte: próprio autor.

Figura 25 – Representação do Ponto 4, com raio de 4.720 m em relação à costa



Fonte: próprio autor.

A verificação dos elementos químicos constituintes da liga foi realizada no espectrômetro da marca Oxford, modelo Fondry-Master Pro, pertencente ao Laboratório de Inspeção da Escola de Engenharia.

A Tabela 7 apresenta a composição química da liga de alumínio 6201. Os resultados obtidos foram comparados com as especificações indicadas nas Normas ASTM B233 e NBR 7103.

Tabela 7 – Composição química Alumínio ASTM

Si máx.	Cu máx.	Mn máx.	Mg máx.	Zn máx.	Ti máx.	Outro máx.	Alumínio mínimo
0,15 %	0,02%	0,05%	0,05%	0,05%	0,05%	0,03%	99,50%

Fonte: Próprio autor.

Para preparação das amostras, foram seccionados seguimentos de aproximadamente 13 mm de comprimentos e embutidos em baquelite, conforme demonstrado na figura 23. Foram ensaiados 20 corpos de prova de cada amostra. Os 20 corpos de prova foram embutidos numa mesma amostra, conforme observa-se na figura 23.

Em seguida, as amostras sofreram sucessivas operações de desbaste e acabamento, através da utilização de lixas da granulometria FEPA 120, 240, 400, 1000 e 1200. Para que fosse obtido um melhor acabamento para as amostras, eliminando marcas e riscos da

operação de lixamento anterior, à cada novo lixamento as amostras eram rotacionadas em 90° até a lixa final.

Após o lixamento as amostras foram polidas com alumina antes de iniciar a etapa seguinte de ataque químico do material.

Figura 26 – Amostras dos cabos embutidas



Fonte: Próprio autor.

### 5.3. Microscopia Ótica

Atualmente, a microscopia ótica [25] é uma das técnicas mais utilizadas para visualização da microestrutura, porosidades, inclusões e, em alguns casos, contornos de subgrãos. Também é possível a visualização de precipitados [26].

Esta técnica possibilita a ampliação de amostras ou suas partes através da incidência de luz sobre o material. O reflexo da luz passa por um conjunto de lentes, ampliando a imagem, possibilitando o aumento do poder de resolução do olho humano. A capacidade de ampliação do microscópio ótico de uma amostra, ou parte dela, a ser analisada, é da ordem de [25] 1500 vezes ou [27] 0,2  $\mu\text{m}$ . A figura 13 traz a representação do microscópio ótico utilizado neste trabalho.

As amostras metálicas a serem analisadas através da microscopia ótica, devem possuir o melhor acabamento superficial possível, além de serem submetidas à um



tratamento denominado ataque químico, que tem por objetivo revelar a microestrutura da amostra.

O acabamento superficial desejado para as amostras [25, 27] é obtido através de sucessivas operações de lixamento, com a utilização de lixas de diferentes granulometrias, de forma progressiva. Após as operações de lixamento, as amostras são polidas e em seguida submetidas ao ataque químico.

#### **5.4. Microdureza Vickers**

Método de dureza que é baseado na relação [28] entre a carga aplicada por um penetrador ou indentador, e a superfície impressa no material.

O indentador tem forma piramidal [27], com ângulo interno de 136° formado entre duas superfícies opostas. A marca imposta pelo penetrador no metal apresenta forma de losango regular,

A indentação é feita por um período que varia entre 10 e 15 segundos, com carga entre 1 kgf e 100 kgf, e o resultado são marcas diagonais na peça. Finalizando o ensaio de microdureza Vickers, divide-se a carga incidida na peça pela área que foi atingida, para que possa ser determinado o índice de dureza Vickers.

O processo de determinação de dureza Vickers apresenta algumas vantagens [25], tais como a existência de apenas uma escala contínua de dureza, aplicável a toda a gama de dureza e de materiais, não causando deformação ao indentador, com impressões extremamente pequenas, podendo ser utilizadas em amostras de espessura reduzida, além de apresentar grande precisão na medida.

#### **5.5. Microscopia Eletrônica De Varredura E Espectroscopia De Energia Dispersiva**

A MEV [29] possibilita a caracterização bem como a observação de estruturas em escala nanométrica, da ordem de 2 a 5 nm, através de um bombardeio por um feixe de elétrons na amostra, varrendo a área sob análise. Através deste ensaio é possível a caracterização tridimensional de uma amostra e o exame com grande profundidade de foco em pequenos aumentos.

O MEV faz uso dos elétrons secundários e retroespalhados, os quais interagem na superfície, permitindo, por exemplo, a identificação de partículas de segunda fase nas ligas de alumínio.

Geralmente acoplada à MEV, a EDS [29] é uma técnica de caracterização qualitativa da composição química de uma amostra através da análise dos sinais de raios X emitidos.

Na EDS, a excitação atômica ocorre quando o feixe eletrônico atinge a amostra, emitindo fótons quando retornam ao estado fundamental. A identificação destes fótons é quantificada e mensurada por um detector de raios X, localizado no interior de uma câmara de vácuo. A partir da aquisição desta quantidade de energia, um sistema hardware e software representa graficamente esta energia em keV, em função de sua quantidade, identificando a composição química da amostra.

### **5.6. Difratorômetro de Raio X**

Foi utilizado neste trabalho um difratômetro de raio X, marca MRL, modelo Philips, X'PERT MPD.

Basicamente esse método envolve a difração de um feixe de raios X monocromático por pequenos cristais ou por um pó fino. O feixe monocromático é obtido por meio do uso de um filtro de níquel. Esse método é muito utilizado na área de metalurgia, como também, para se estudar ligas polifásicas, produtos de corrosão, refratários, rochas, etc. Além disso, apresenta a vantagem de não destruir e nem necessitar de um preparo especial do material em questão [30].

## **6. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Cada ensaio foi realizado com todas as amostras, de maneira que seus resultados serão apresentados nos subitens a seguir.

### **6.1. Microscopia Ótica**

As imagens obtidas através do ensaio de microscopia ótica são apresentadas na Figura 27, para cada amostra, com ampliação de 500 vezes.

Ainda, para cada amostra também foram obtidas imagens com diversas ampliações diferentes, de 50, 100, 200 e 1000 vezes, para uma melhor avaliação do comportamento da liga, após ter sido submetida às condições de campo e amostra nova, as quais já foram descritas neste trabalho.

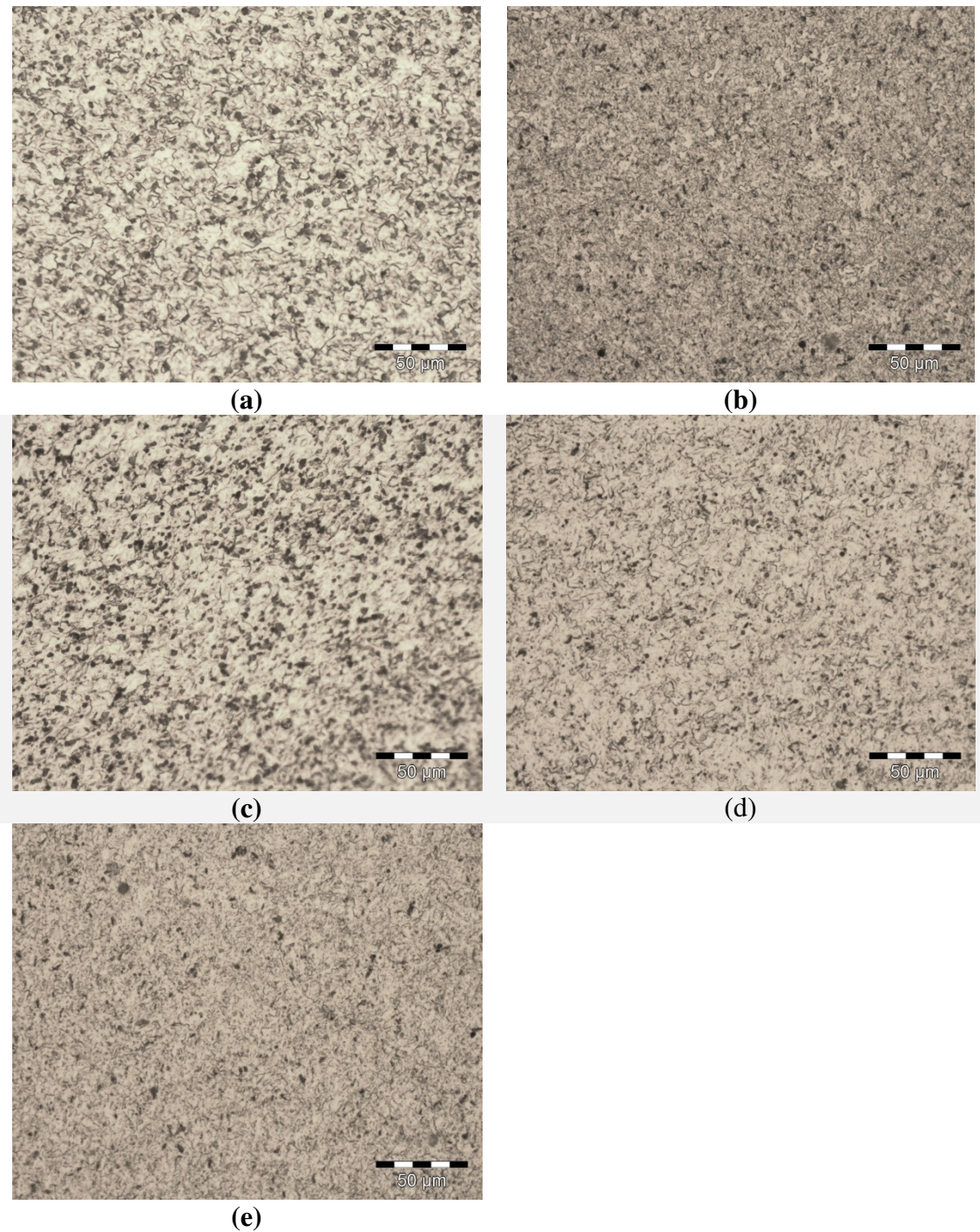
As demais imagens estão disponíveis no Apêndice deste trabalho, nas Figuras 41 a 70.

Conforme pode ser verificado nas imagens, não foi possível, em nenhuma das amostras analisadas, obter com clareza o contorno de grão.

Isto se deve a diversos fatores, mas o primordial é a formação da camada de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Posteriormente na análise de MEV é possível identificar a microestrutura da liga com maior clareza.

Figura 27 – Imagens de microscopia ótica, a) cabo novo, b) 650m da costa, c) 1.550 m da costa, d) 3.270 m da costa, e) 4.720 m da costa



Fonte: próprio autor.

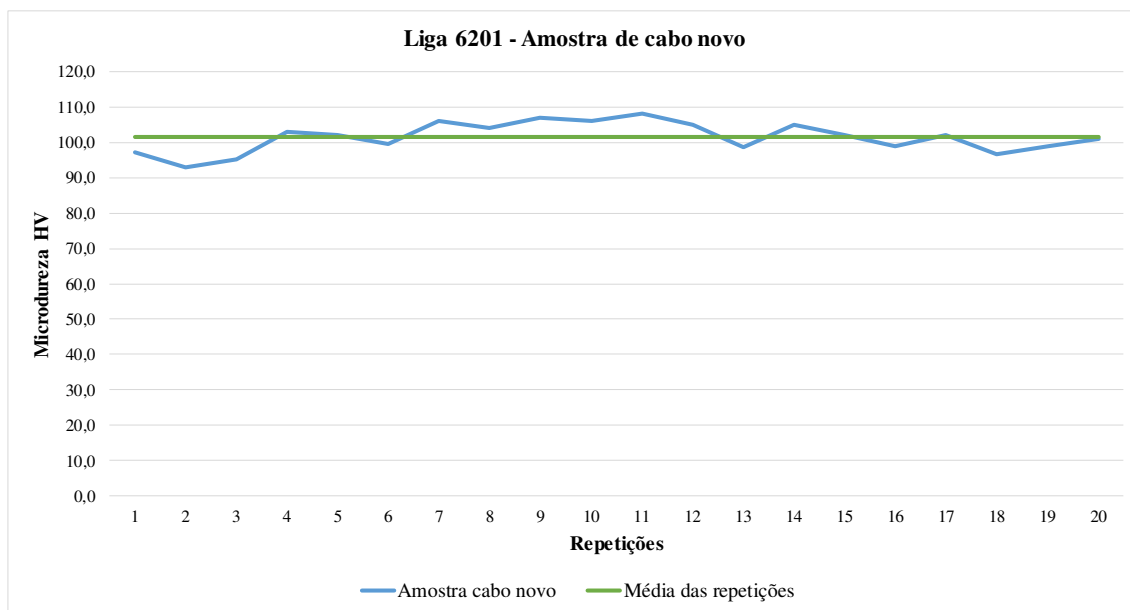
Através da análise da microscopia ótica não foi possível avaliar algum dano sofrido pelo material.

A microscopia eletrônica de varredura realizada nos trará melhores resultados, indicando ser uma técnica mais eficaz para esta especifica análise[39].

## 6.2. Microdureza Vickers

A figura 28 apresenta o perfil de microdureza da liga de alumínio 6201 sem uso. Nota-se que ocorre uma oscilação dos valores, mas todos ficam numa faixa de 92 a 108 HV. Foram ensaiados 20 corpos de prova.

Figura 28 – Curvas com ensaio de microdureza Vickers para a amostra de cabo novo



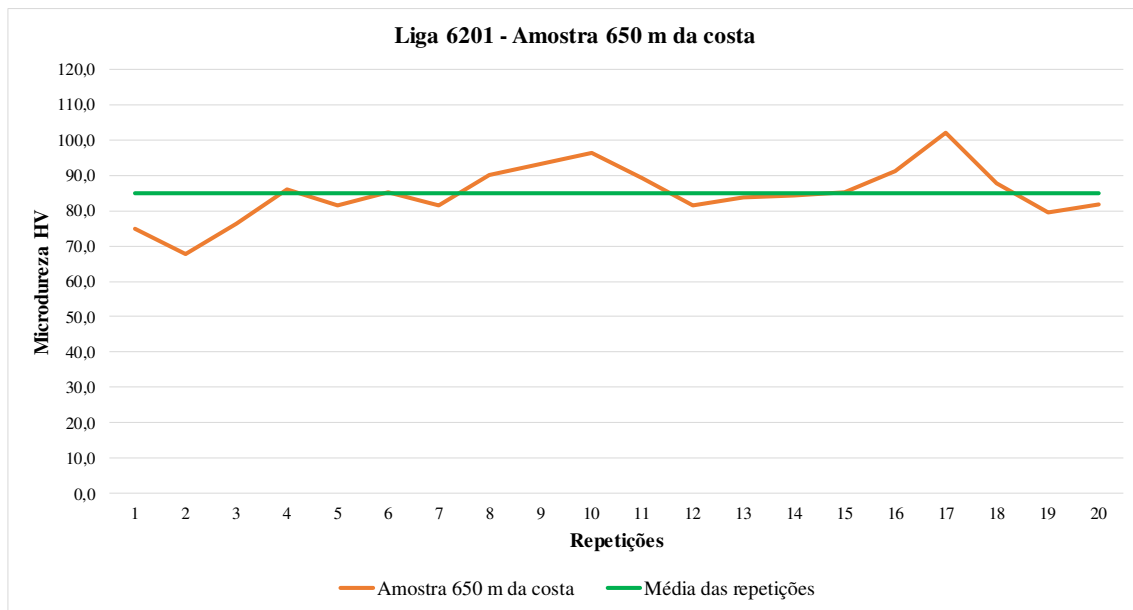
Fonte: próprio autor.

Estes valores correspondentes estão dentro da faixa aceitável, pois pela norma, o valor médio é de 85 HV e o valor mediano encontrado foi de 101 HV. Observou-se uma dureza levemente superior, podendo este valor ser atribuído ao envelhecimento natural que a liga pode ter sofrido [38].

A primeira amostra analisada que sofreu a maior ação das intempéries foi a amostra 1, ou seja, aquela em que se encontrava a 650 metros da costa, para a qual os valores de microdureza encontrados são apresentados na figura 29.



Figura 29 – Curvas com ensaio de microdureza Vickers para amostra à 650 m da costa

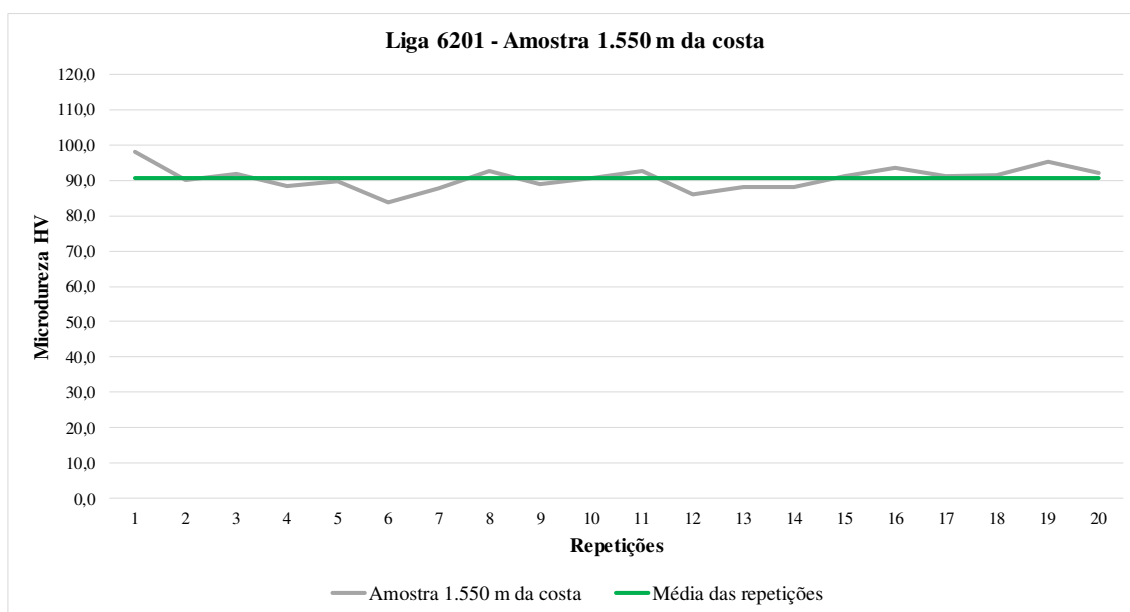


Fonte: próprio autor.

Esta foi, dentre as 04 (quatro) amostras analisadas, a que se encontrava mais próxima da costa. Do ponto de vista da degradação do material, esta deveria apresentar os maiores níveis. Podemos notar que em relação a dureza, ocorreu uma leve diminuição na dureza, notando-se um valor de 68 HV de mínimo e de 101 HV de máximo, com uma média de 85HV. Já se observa uma leve degradação do material quando este se encontra mais próximo à costa [15].

As figuras 30 e 31 apresentam respectivamente as amostras 02 e 03, ou seja, uma distância de 1.550 metros e 3.270 metros.

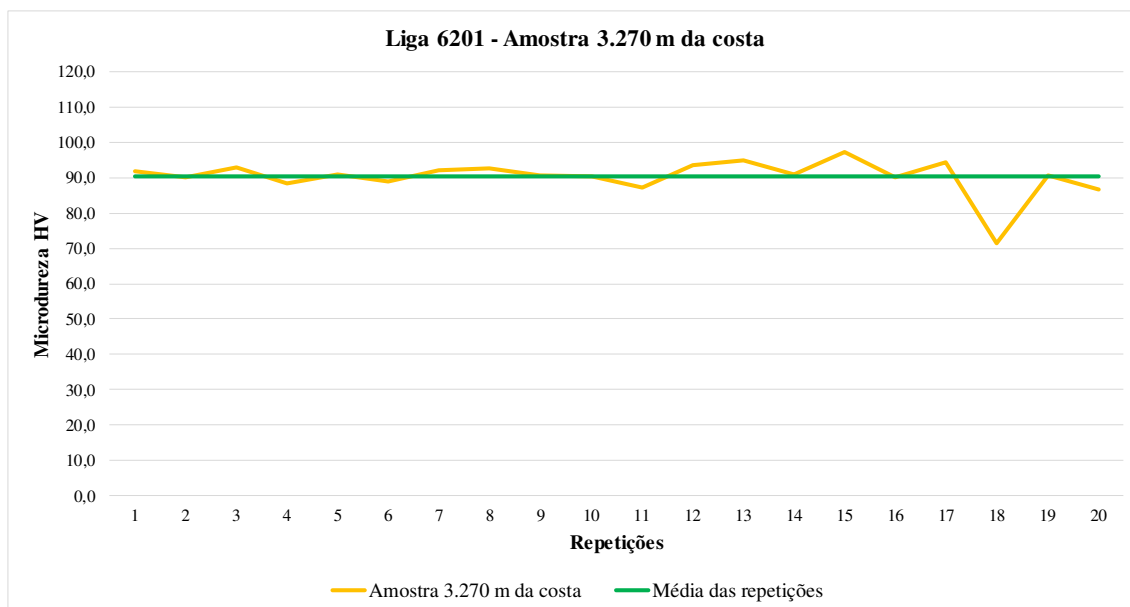
Figura 30 – Curvas com ensaio de microdureza Vickers para amostra à 1.550 m da costa



Fonte: próprio autor.

Observa-se que tanto na amostra a 1.550 m quanto na amostra a 3.270 m ocorreram uma diminuição da dureza, mas com um efeito menor quando comparado a amostra obtida a 650m da costa.

Figura 31 – Curvas com ensaio de microdureza Vickers para amostra a 3.270 m da costa



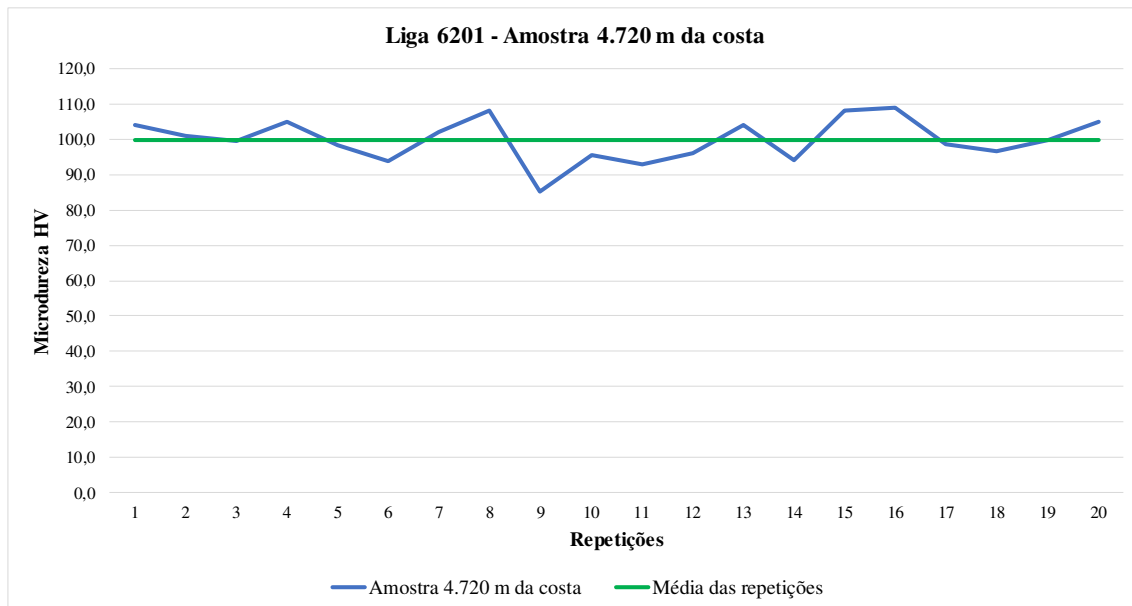
Fonte: próprio autor.

A média das duas amostras com 1.550 metros da costa e a amostra com 3.270 metros da costa ficou em 90 HV, bem próximo do valor médio de 86 HV da amostra mais

próxima da costa. Apesar da pequena diferença entre as durezas médias do material sem uso, nota-se que ainda se encontram dentro do nível exigido da norma, que é de 84 HV.

Ao se analisar a amostra a 4.720 m, ou seja, aquela que se encontrava mais distante da costa, a dureza se aproxima em muito da condição original, conforme pode ser verificado na figura 32.

Figura 32 – Curvas com ensaio de microdureza Vickers para amostra a 4.720 m da costa

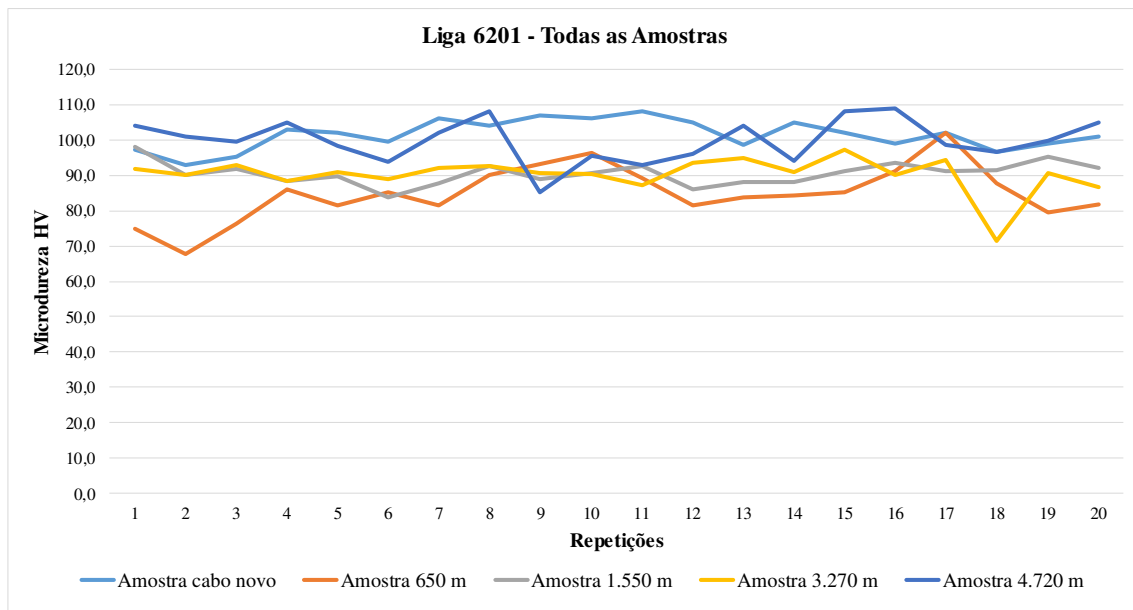


Fonte: próprio autor.

Nota-se que a variabilidade é bem menor e que a dureza média ficou em aproximadamente 100 HV. Estes resultados são de grande importância pois traçam um perímetro ao longo da costa em que os efeitos atmosféricos são mais efetivos. Diferentemente das ligas ferrosas, a proteção da camada de alumina formada protege de maneira mais efetiva, diminuindo os custos de manutenção [55].

Na figura 33, é possível observar as diferenças encontradas entre os cabos novos e os mais afastados da costa.

Figura 33 – Curvas com ensaio de microdureza Vickers para todas as amostras da liga

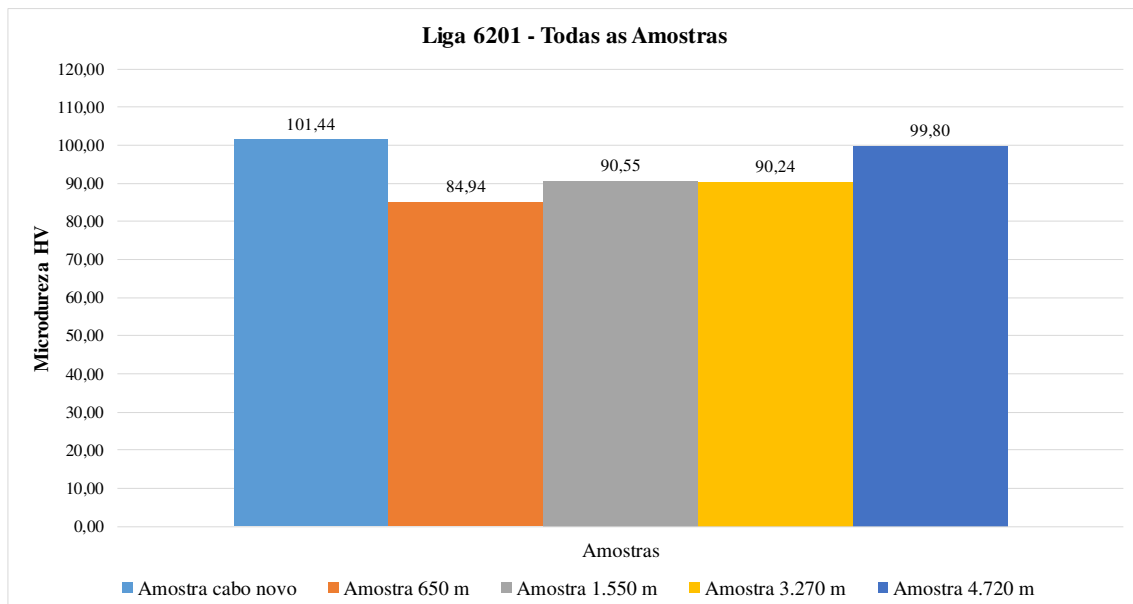


Fonte: próprio autor.

Apesar da redução média de 14% na dureza, esta ainda fica dentro do mínimo exigido em norma.

Para uma melhor análise, a figura 34 compara as médias das durezas de cada amostra.

Figura 34 – Dureza média de cada amostra da liga AL 6201



Fonte: próprio autor.

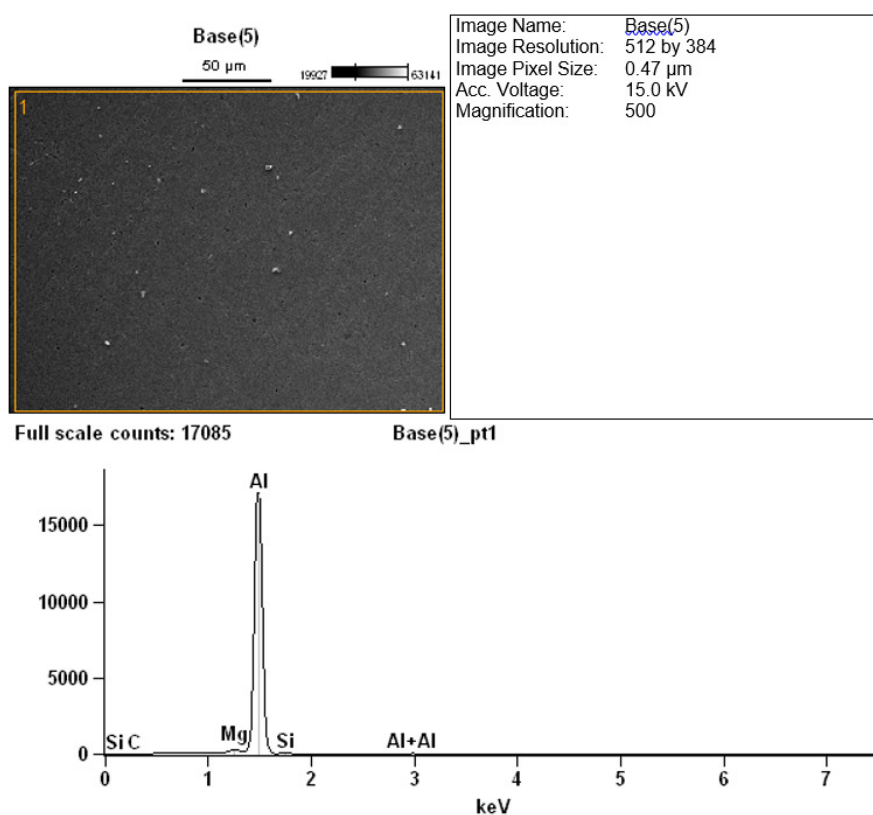
O que se pode analisar que após 17.550 horas de uso, todas as amostras ainda estavam aptas para o trabalho.

### 6.3. Microscopia Eletrônica De Varredura/ Espectroscopia de Energia Dispersiva

Com o intuito de observar a ocorrência ou não da degradação microestrutural foi realizado a análise de microscopia eletrônica de varredura e também a espectroscopia de energia dispersiva, utilizando como complemento a técnica de formação da imagem através de filtros dos elementos químicos da liga.

Na figura 35 estão apresentados os resultados da análise para a amostra de um cabo novo, retirado do estoque.

Figura 35 – MeV da Amostra de cabo novo, sem uso



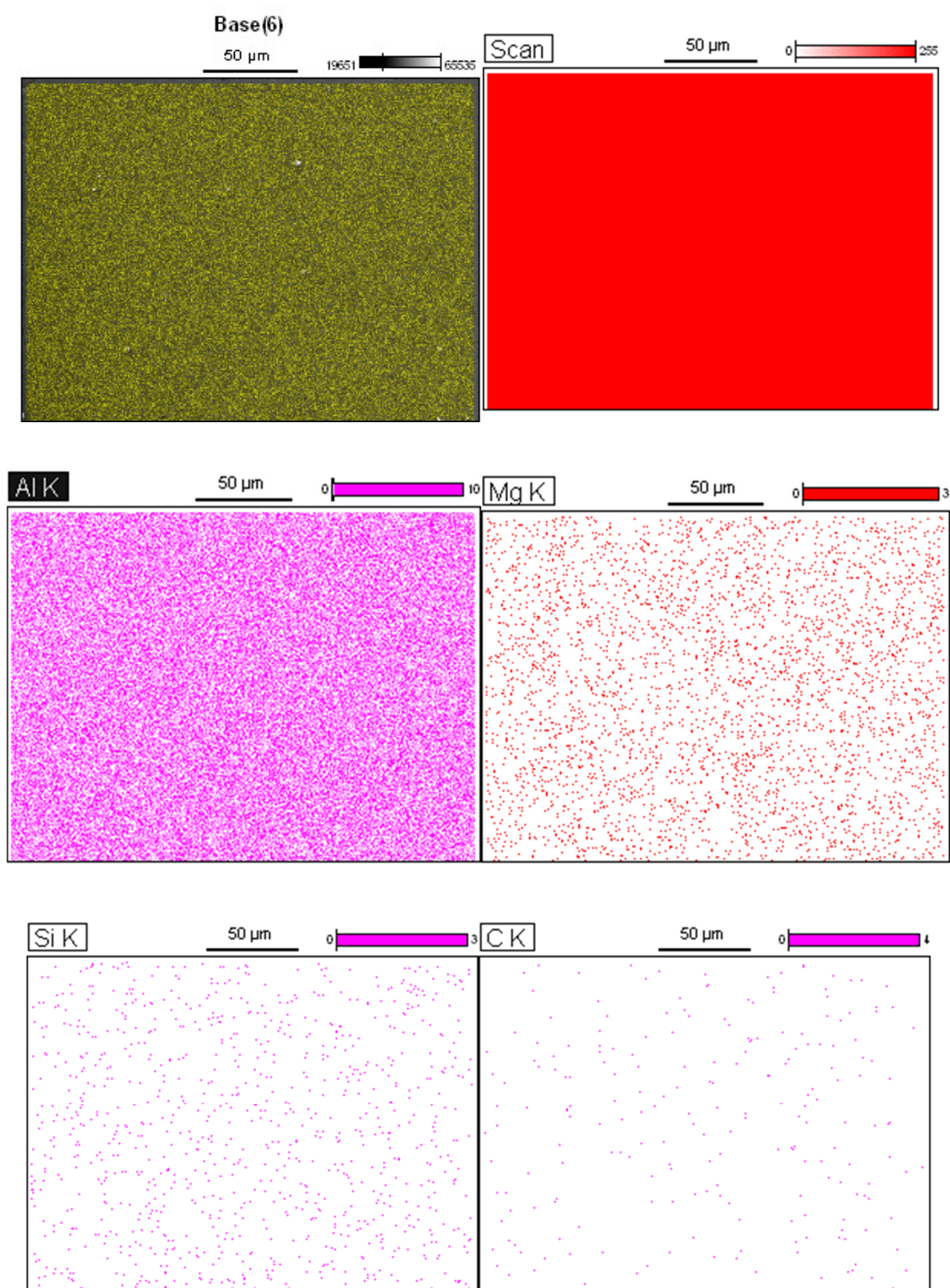
Fonte: próprio autor.

A amostra sem uso apresenta uma matriz de alumínio com a presença de alguns intermetálicos de Si e Mg.

Quando se aplica a técnica de formação de imagem através do filtro de elementos, é possível observar como estes elementos estão dispersos ao longo da liga. Como as ligas de alumínio, em sua maioria, sofrem envelhecimento natural, ou seja, a temperatura ambiente ocorre a difusão de elementos e possível formação de intermetálicos, conhecer como estes elementos estão distribuídos torna-se de grande relevância. Este tipo de abordagem não teria sentido por exemplo, se o material fosse aço, porque neste caso, a

temperatura ambiente não ocorreria movimentação atômica, sendo o fenômeno principal a corrosão. Através do filtro de elementos, conforme figura 36, é possível observar os elementos da amostra sem uso.

Figura 36 – Formação da imagem através dos filtros dos elementos da amostra sem uso

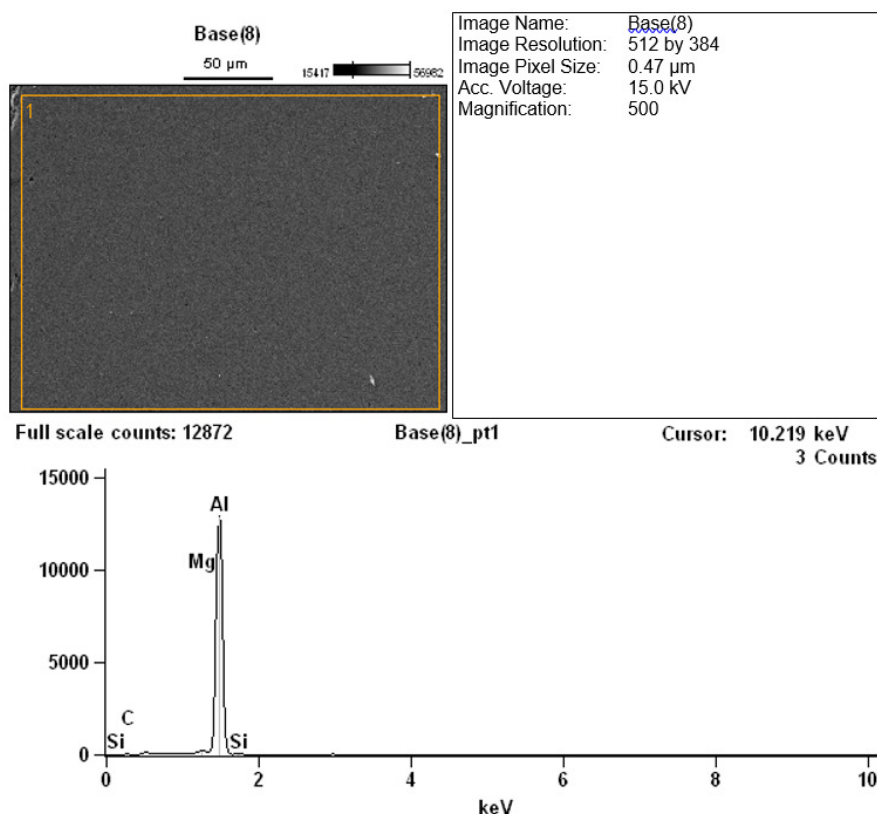


Fonte: próprio autor.

Nota-se que a distribuição do alumínio é igual em todas as partes da liga, seguido do magnésio em menor quantidade e o silício se concentrando mais nos contornos de grão.

A figura 37 apresenta o MEV realizado na amostra distante 650 metros da costa.

Figura 37 – MeV da Amostra a 650 m da costa



Fonte: próprio autor.

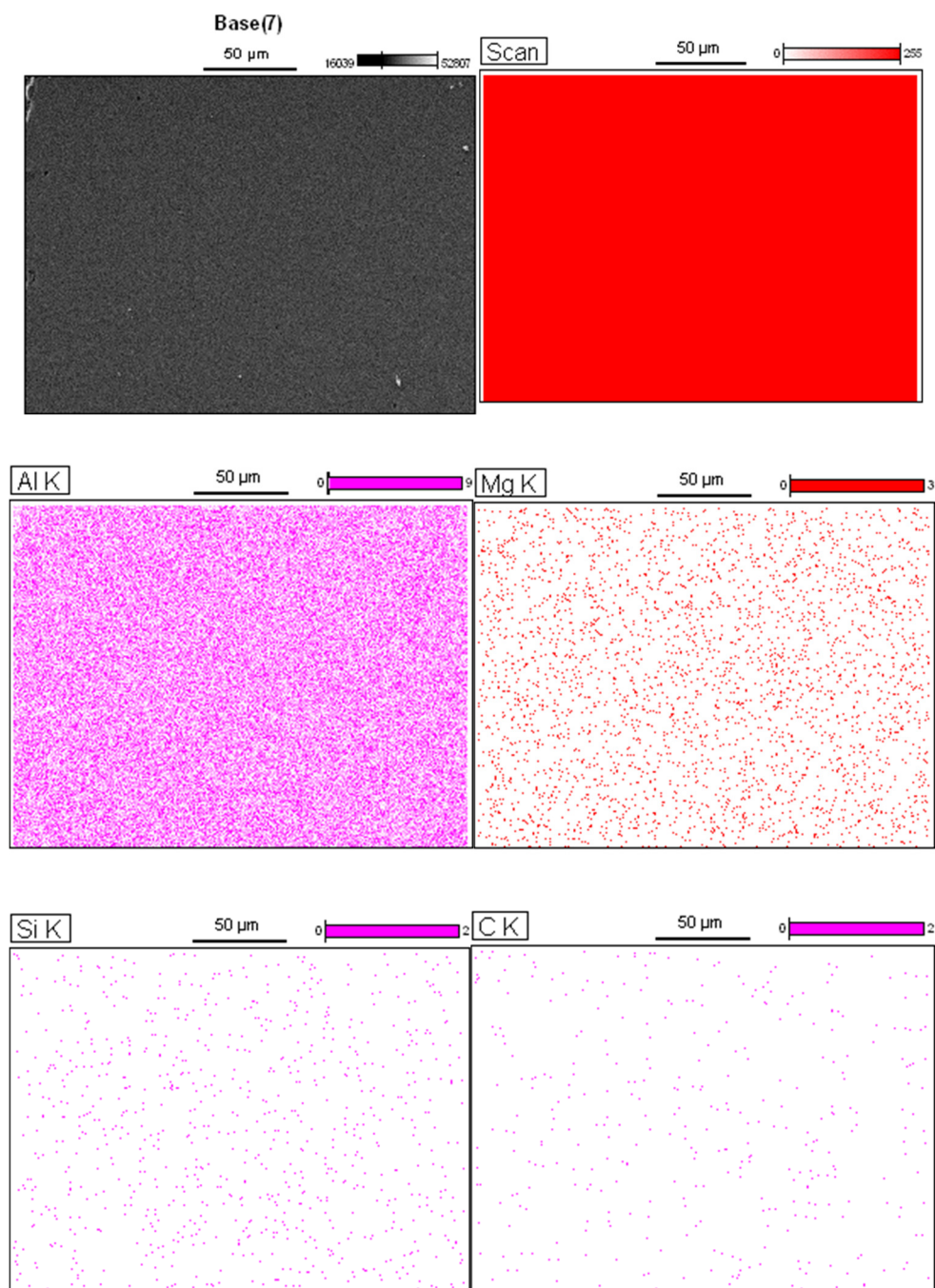
A ocorrência de envelhecimento natural gera precipitados coerentes na matriz, não podendo ser vistos pela microscopia. A figura abaixo, que ficou 17.550 horas em operação e a 650 metros da costa não apresenta visualmente diferenças da amostra original, mas isto não significa que não tenha ocorrido precipitação de intermetálicos.

Como todas as amostras foram expostas ao mesmo tempo de exposição, tendo como variável a distância da costa, é de se esperar o mesmo comportamento microestrutural para todas, já que não ocorre grandes diferenças de temperatura entre as distâncias analisadas.

A figura 38 mostra a formação da imagem a partir de filtros de elementos da amostra distante 650 metros da costa.



Figura 38 – Formação da imagem através dos filtros dos elementos da Amostra à 650 metros da costa



Fonte: próprio autor.

A comparação entre as duas imagens formadas por filtros de elementos nos indica que o magnésio está um pouco mais concentrado nos contornos de grão, demonstrando que o efeito de 17.550 horas teve algum efeito. Não podemos afirmar se ocorreu uma difusão do elemento apenas ou se ocorreu a formação de intermetálicos. Só podemos ter a informação confirmada desta possível formação de intermetálicos se na análise de DRX



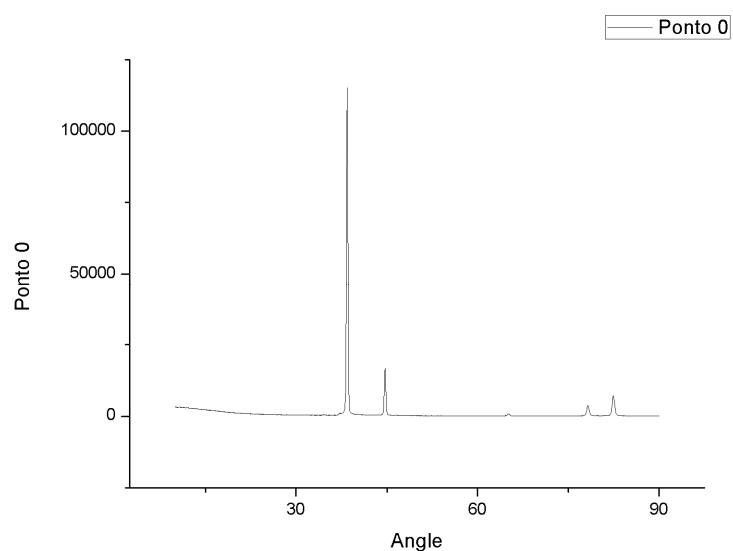
for identificada uma nova fase. Em relação ao silício não é possível realizar tal afirmação, pois as imagens são praticamente as mesmas. Correlacionando a possível formação de precipitados e/ou precipitação de algum elemento no contorno de grão com o aumento de dureza do material, era de se esperar que nos ensaios de dureza se refletissem tal fenômeno. O que se observou foi um efeito contrário, ou seja, uma diminuição na dureza. O que podemos indagar é que a degradação devido ao fenômeno de corrosão foi mais eficiente na perda da resistência do que no envelhecimento natural da liga.

Para as amostras analisadas a 1.550, 3.270 e 4.270 metros da costa, foram apresentadas as mesmas características, portanto estes resultados estão disponíveis no apêndice em anexo.

#### **6.4. Difratometria de Raios X**

O ensaio de difratometria de raios-X pode ser utilizado em algumas condições como ferramenta para identificação de precipitados e fases. Como existe a possibilidade de ocorrência de surgimento de fases devido ao envelhecimento natural de 17.550 horas, torna-se importante a utilização desta ferramenta. Neste caso, também serão comparados apenas a amostra sem uso e uma das quatro amostras. Foi escolhida a amostra a 650 m da costa, por estar mais próxima do ambiente agressivo. Vale de novo salientar que o efeito do envelhecimento natural será semelhante nas 04 amostras de campo, pelo fato das mesmas estarem submetidas a mesma temperatura e tempo. Foram realizadas as análises em todas as amostras e os resultados das amostras a 1.550, 3.270 e 4.270 metros da costa se encontram no apêndice, onde é possível verificar que todos os resultados foram semelhantes. A figura 39 apresenta o difratograma da amostra sem uso.

Figura 39 – Difratrograma da amostra de cabo novo

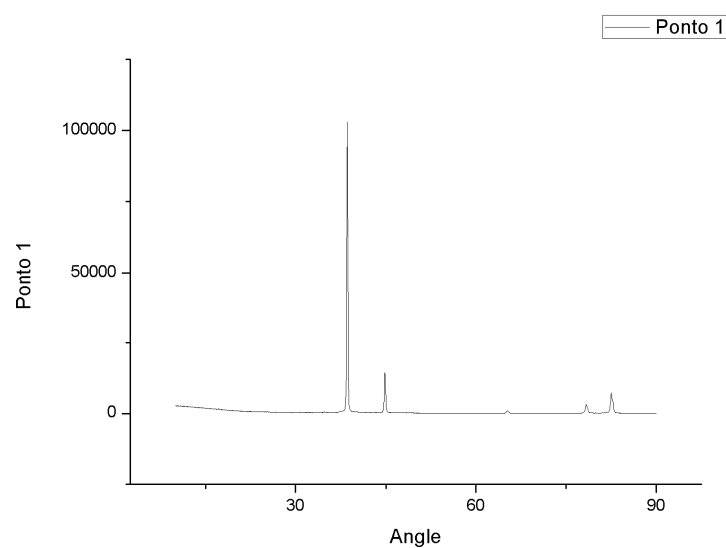


Fonte: próprio autor.

Podemos indicar 04 picos, situados entre os ângulos de 30° e 90°. O primeiro pico, com maior intensidade, trata do alumínio e os picos menores do silício e magnésio.

Na figura 40 temos o difratograma da amostra distante 650 metros da costa.

Figura 40 – Difratrograma da amostra a 650 m da costa



Fonte: próprio autor.

Ao compararmos os dois difratogramas, podemos concluir que os mesmos são muito semelhantes, ou seja, a formação de uma segunda fase nesse tempo de envelhecimento foi muito pequena. Observa-se um pequeno pico os ângulos de  $60^\circ$  e  $75^\circ$ . Este pico pode ser relacionado com a formação de uma segunda fase, mas como sua intensidade é muito pequena, não é possível afirmar com absoluta certeza. Na amostra a 3.270 m da costa, cujo resultado está disponível no apêndice, é possível observar com melhor clareza este pico.

## 7. CONCLUSÕES

A partir da presente pesquisa podemos concluir que:

- Um material quando está exposto a um ambiente corrosivo, quanto maior a proximidade a este meio, maior será a perda de resistência. Ao se analisar a queda desta resistência, notou-se que a 650 metros da costa, condição mais severa, ocorreu uma diminuição de 14% na medida de dureza, já não ocorrendo esta perda para distâncias mais afastadas;

- À medida em que foram analisadas amostras obtidas de pontos mais afastados em relação à costa, constatou-se que a redução da dureza se deu em níveis menores, ficando em torno de 10% para as amostras a 1.550 metros e 3.270 metros da costa, não ocorrendo, portanto, variação significativa da resistência mecânica no trecho de 1.720 metros entre uma amostra e outra;

- Quanto mais afastado da região de maior severidade, era esperado que não houvesse variação significativa na resistência mecânica do material estudado, situação que se confirmou ao analisar a amostra obtida a 4.720 metros da costa, para a qual em 17.550 horas, verificou-se que não ocorreu perda da resistência;

- Não foi observada alteração microestrutural da liga devido ao efeito do envelhecimento natural, durante as 17.550 horas de exposição, em nenhuma das amostras estudadas, tanto próxima como mais afastada da costa, em comparação com a amostra de cabo novo;

- Ainda, não se observou a formação de intermetálicos durante o processo de envelhecimento natural em nenhuma das amostras analisadas;

- Ocorreu uma degradação da liga de alumínio 6201, da costa até a distância de 4.720 metros, mas essa degradação, após dois anos de exposição ao carregamento elétrico e as condições ambientais específicas da região estudada, não comprometeu o limite de resistência do material, o que atesta o bom desempenho do material para as condições de operação para as quais foi projetado.

## **8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Retirar amostras com tempos de exposição maiores;
- Realizar ensaios de corrosão potenciodinâmico;
- Simulação acelerada em câmara cíclica de corrosão.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/biblioteca>>. Acesso em: 18 de março de 2017.
- [2] KAGAN, N.; OLIVEIRA, C.; ROBBA, E. J. **Introdução aos Sistemas de Energia Elétrica**. 2nd. ed. São Paulo: Blucher, 2010.
- [3] NOS. **Operador Nacional do Sistema Elétrico**. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/>>. Acesso em: 18 de março de 2017.
- [4] PRODIST. **Procedimentos de Distribuição**. 2017. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area>>. Acesso em: 18 de março de 2017.
- [5] MUNGER, C. G.; VICENT, L. D. **Corrosion prevention by protective coatings**. 3 ed. São Paulo: National Association of Corrosion Engineers, 1984.
- [6] MAYNE, J. E. O. **The mechanism of the inhibition of the corrosion of iron and steel by means of paint**. Official Digest - Federation of Societies for Paint Technology, v. 24, p. 127-136, 1952.
- [7] CLARK, H. **Encyclopedia of Chemistry, Ions**. Rinhold Publishing Corp., New York, NY, p. 46, 1957.
- [8] CRAMER, S. D.; COVINO, B. S. JR. ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMITEE: **Metals Handbook, v. 13 (Corrosion)**, 3 ed., 1990.
- [9] SILVA, J. M.; PORTELLA, K.F.; DALLEONE, E.; D'ALCAINE, C.V. **Exposição de materiais metálicos em estações atmosféricas no Paraná. Parte I – Dois anos de experiência**. In: Congresso Iberoamericano de corrosão e proteção, v. 1, n. 3, Rio de Janeiro: p. 471, 1989.
- [10] D'ALCAINE, C. V.; CUNHA, M. R.; MIELE, A. C.; AZARITE, J. E. **Conclusões e perspectivas sobre a corrosão de linhas telefônicas aéreas no Brasil**. Anais do I Simpósio Internacional sobre novas tecnologias em redes telefônicas, v.1, p. 73-79, 1985.
- [11] VIANNA R. O. **O programa de corrosão atmosférica desenvolvido pelo CENPES**. Boletim Técnico PETROBRÁS, v. 23, n. 1, p. 39-47, 1980.
- [12]. SISGA. **Ensino Mapa clima do Brasil**. Disponível em: <<http://campeche.inf.furb.br/sisga/educacao/ensino/mapaClima.php>>. Acesso em: 27 de Setembro de 2019.
- [13] Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Gonçalves, J.L.M.; Sparovek, G. **Köppen's climate classification map for Brazil**. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

- [14] PERERA, D. Y. **Physical ageing of organic coatings**. Progress in Organic Coatings, v. 47, p. 61-76, 2003.
- [15] MORCILLO, M.; CHICO, B.; MARIACA, L.; OTERO, E. **Salinity in marine atmospheric corrosion: its dependence on the wind regime existing in the site**. Corrosion Science, v. 42, p. 91-104, 2000.
- [16] KUCERA, V.; MATTSON, E. **Corrosion Mechanism**, editado por MANSFELD, F. Ed. Marcel Dekker Inc., New York, U.S.A., p. 211-220, 1987.
- [17] Relatório Técnico nº. 5A: **Observações e medições nas estações de corrosão atmosféricas no litoral**. Projeto Litoral. CESP – Companhia Energética de São Paulo. São Paulo, 1987.
- [18] BARTON, K. **Protection against atmospheric corrosion**. 1 ed. New York: John Wiley, 1987.
- [19] FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUÍS ROESSLER – FEPAM/RS. **Rede Estadual de Monitoramento Automático da Qualidade do Ar Relatório 2013 e 2014**. Porto Alegre, 2015.
- [20] DAVIES, G. **Aluminium Alloy (6201, 6101A) conductors**. International Conference on Overhead Line Design and Construction: Theory and Practice (up to 150 kV), p. 93-97, 1988.
- [21] ALUMINUM ASSOCIATION **International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminium and Wrought Aluminum Alloys**, 1997.
- [22] LABEGALINI, P. R.; LABEGALINI, J. A.; FUCHS, R. D.; ALMEIDA, M. T. **Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1992.
- [23] NEXANS FICAP. **Catálogo de cabos especiais para linhas de transmissão aérea**. Nexans. Lorena. 2013.
- [24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 07270: Cabos de Alumínio com Alma de Aço para Linhas Aéreas**. Rio de Janeiro. 1988.
- [25] ESPÓSITO, I. M. **Caracterização e Cinética de recristalização da liga de alumínio 6063 após tratamentos termomecânicos**. 82f. Dissertação (Ciência dos Materiais – Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, 2006.
- [26] OLIVEIRA, R. A. **O Forjamento de Ligas de Alumínio – Um estudo para a Liga ABNT 6061**. 127 f. Dissertação (Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.
- [27] FERRARI, R. B. **Caracterização de uma liga metálica a base de alumínio – magnésio obtida por método convencional após tratamentos termomecânicos**

**visando estruturas microcristalinas.** 85f. Dissertação (Tecnologia Nuclear) – Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade de São Paulo, 2008.

[28] DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy**. 3. Ed. McGraw-Hill, Philadelphia, USA, 1986. ISBN 978-0070168930.

[29] SOARES, M. R. N. **Efeitos dos ciclos de envelhecimento no comportamento de ligas de alumínio.** 114f. Dissertação (Engenharia de Materiais) – Universidade de Aveiro, Portugal, 2009.

[30] VAN VLACK, L. H. **Elements of Materials Science and Engineering**. 6. ed. Nova Jersey: Prentice Hall, 1989.

[31] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO – ABAL, **Fundamentos e aplicações do Alumínio**, São Paulo: ABAL, 2007.

[32] AMERICAN SOCIETY OF MATERIALS. ASM Metals Handbook: **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**, Ohio, USA: ASM International, v. 2, 1990.

[33] SILVA, A. M. B. D. **Estudo Sobre o Comportamento em Fadiga de Alto Ciclo das Ligas de Alumínio AA6005 T6, AA6063 T6 e AA6351 T6.** 157f. Dissertação (Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, 2013.

[34] MARTINS, M. M. M. **Estudo do Comportamento das Ligas de Alumínio 6061 e 6082.** 130 f. Dissertação (Engenharia de Materiais). Universidade de Aveiro, Portugal, 2008.

[35] ASKELAND, D. R.; PHULÉ, P. P. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. Cengage Learning, São Paulo – SP, 2008.

[36] DUARTE, R. N. **Solidificação unidirecional transitória, microestrutura e propriedades termofísicas e mecânicas de ligas Al-Ag-(Cu).** 208f. Tese (Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2016.

[37] ROSSI, V. L. **Influência da composição química e dos parâmetros de processo sobre a Resistência à corrosão em peças fundidas usando as ligas de alumínio 356 e A356.** 111f. Dissertação (Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade do Estado de Santa Catarina, 2004.

[38] FREITAS, P. S. **Tratamento térmico dos metais: da teoria à prática.** São Paulo: SENAI-SP Editora, 2014.

[39] ROHDE, R. A. Metalografia preparação de amostras. **Laboratório de ensaios mecânicos. Universidade Regional Integrada do alto Uruguai e Missões, 3ª Edição, Rio Grande do Sul,** 2010.

[40] VERRAN, G. O.; MORAES, A. C.; VERRI, A. A. **Influência da composição química na resistência à corrosão em ligas de alumínio de fundição.** In: XV Seminário



de Iniciação Científica da UDESC, 2005, Joinville. Anais do XV Seminário de Iniciação Científica da UDESC. Joinville: UDESC, 2005.

[41] PHILIPSON, F. R.; OLIVEIRA, G. **2º Seminário técnico de tratamento Térmico do Alumínio e suas Ligas – ABAL/SENAI**, Osasco, 2002.

[42] ABAL – Associação Brasileira do Alumínio. **Guia técnico do alumínio: tratamento térmico do alumínio e suas ligas**. 2 ed. São Paulo, 2011.

[43] BRADASCHIA, C. **Fundições de Ligas Não-Ferrosas**. In: CURSO ABM, 1988, São Paulo. Técnicas de fundição do Alumínio e suas ligas, São Paulo: ABM, 1988.

[44] ECKERMANN, F.; SUTER, T.; UGGOWITZER, P. J.; AFSETH, A.; SCHMUTZ, P. **The influence of MgSi particle reactivity and dissolution processes on corrosion in Al–Mg–Si alloys**. *Electrochimica Acta*. v. 54. p. 844-855, 2008.

[45] BRITO, C. **Parâmetros Térmicos e Microestruturais na Solidificação Transitória de Ligas Al-Mg e Al-Mg-Si e Correlação com Resistências Mecânica e à Corrosão**, 2016. 205f.Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2016.

[46] KUMAR, K. C. H.; CHAKRABORTI, N.; LUKAS, H.; BODAK, O.; ROKHLIN, L. **SpringerMaterials**, 2005.

[47] ZHANG, J.; FAN, Z.; WANG, T.; ZHOU, B. **Microstructural development of Al-15wt.% Mg2Si in situ composite with mischmetal addition**, Department of Materials Engineering, Brunel University, 2001.

[48] HOWARD, R; BOGH, N; MACKENZIE, D. S. **Heat Treating Processes and Equipment**. In *Handbook of Aluminum Vol. 1: Physical Metallurgy and Processes*, 2003.

[49] BRAY, J. W. **Aluminum Mill and Engineered Wrought Products**. In *Handbook, Metals. "vol. 2" Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, 1992.

[50] ZOLOTOREVSKY, V. S.; BELOV, N. A.; GLAZOFF, M. V. **Casting aluminum alloys**. Elsevier, 2007.

[51] LIU, Y. L.; KANG, S. B. **Solidification and Segregation of Al-Mg Alloys and Influence of Alloy Composition and Cooling Rate**. *Materials Science and Technology*. v. 13, p.331-336, 1997.

[52] AMERICAN SOCIETY OF MATERIALS., **A Compendium of Processing Maps, Second Edition**, ASM International, 2015.

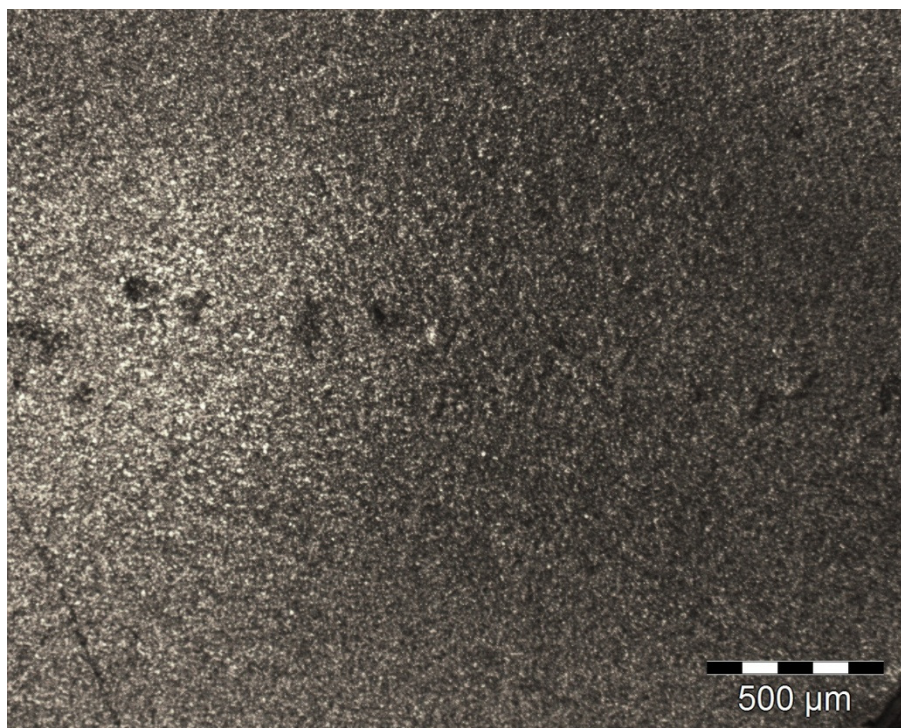
[53] AMERICAN SOCIETY OF MATERIALS. *ASM Metals Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, Ohio, USA: ASM International, 1990.

[54] KARABAY, S.; FEYZULLAHOGLU, E. **Determination of early failure sources and mechanisms for Al99.7% and Al-Mg-Si alloy bare conductors used in aerial transmission lines**. *Engineering Failure Analysis* 38, 2014, p. 1-15.

[55] BARBOSA, C. F.; NALLIN, F. E.; DE SOUZA, R. N. **Device and method for inspecting aluminum cables with a steel core (aluminum conductor steel reinforced—ASCR) installed in energized electrical energy lines.** U.S. Patent n. 9,696,280, 2017.

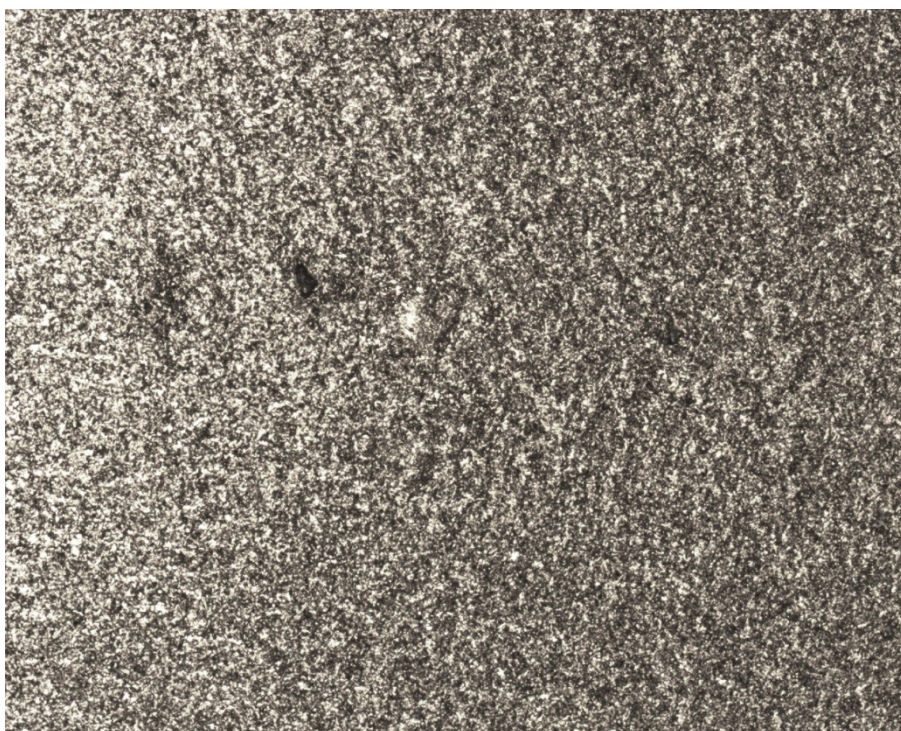
## 9. APÊNDICE

Figura 41 – Imagem da amostra de cabo novo, ampliada 50x



Fonte: próprio autor.

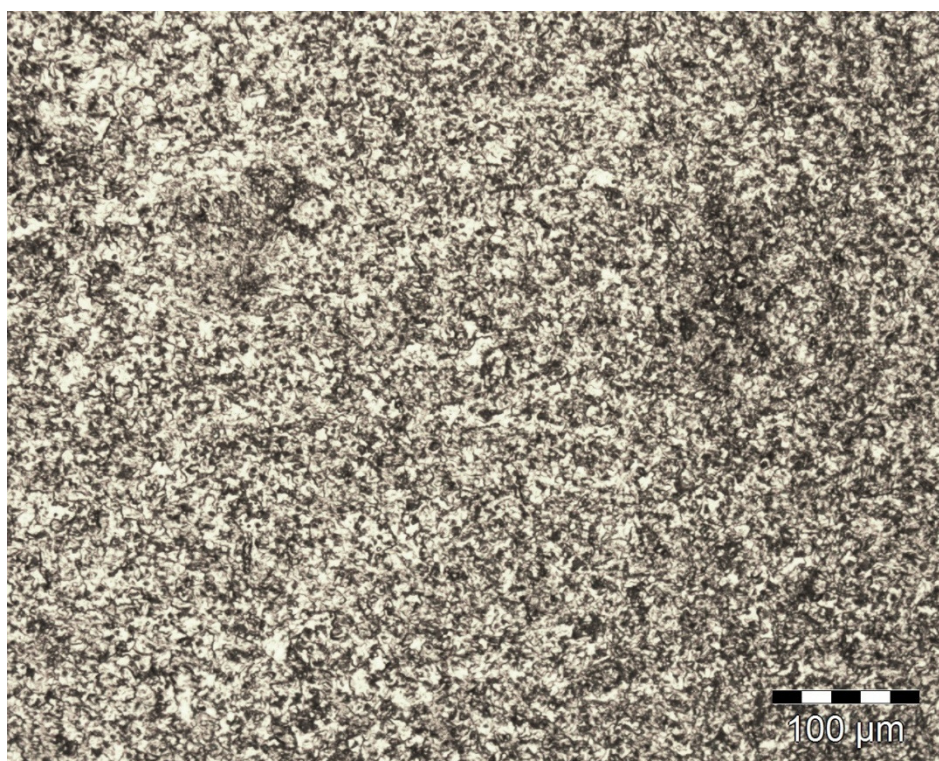
Figura 42 – Imagem da amostra de cabo novo, ampliada 100x



Fonte: próprio autor.

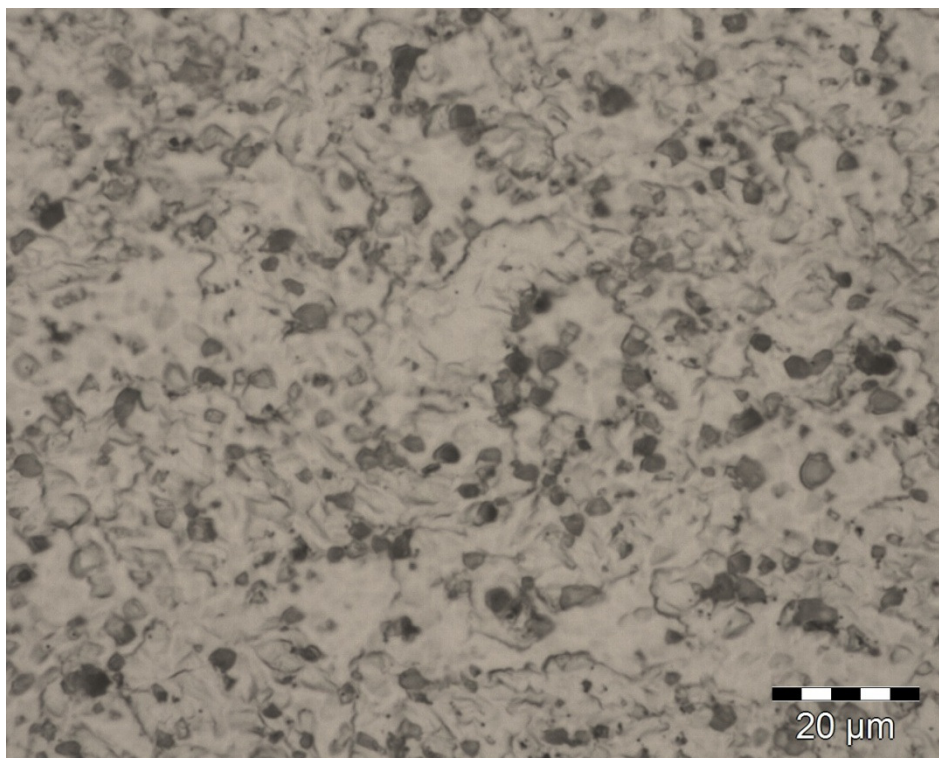


Figura 43 – Imagem da amostra de cabo novo, ampliada 200x



Fonte: próprio autor.

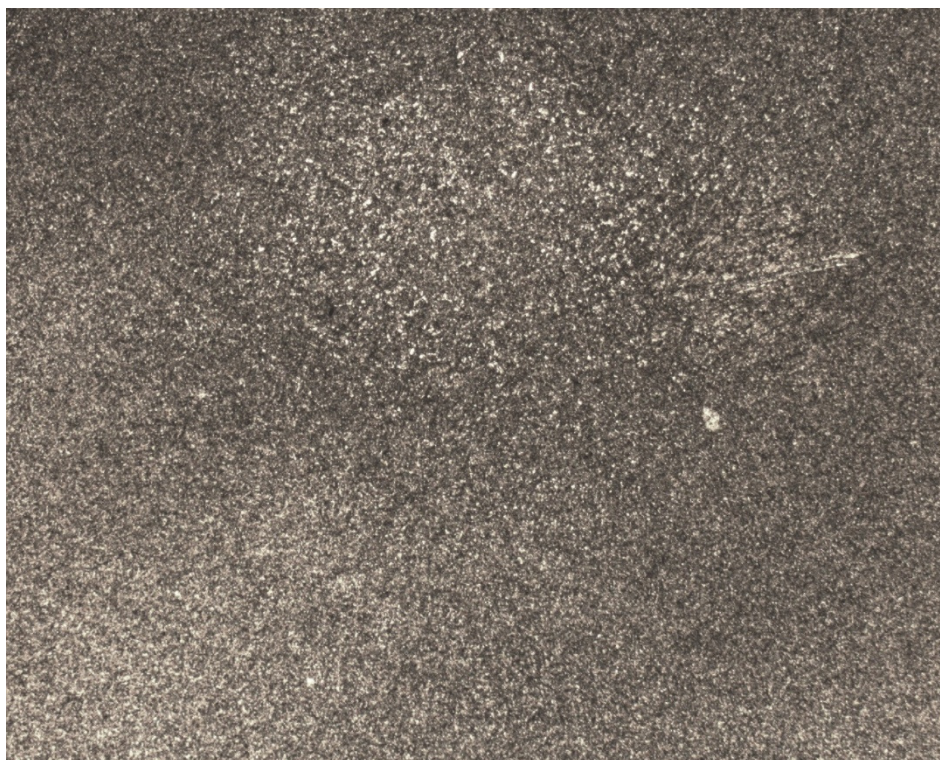
Figura 44 – Imagem da amostra de cabo novo, ampliada 1000x



Fonte: próprio autor.

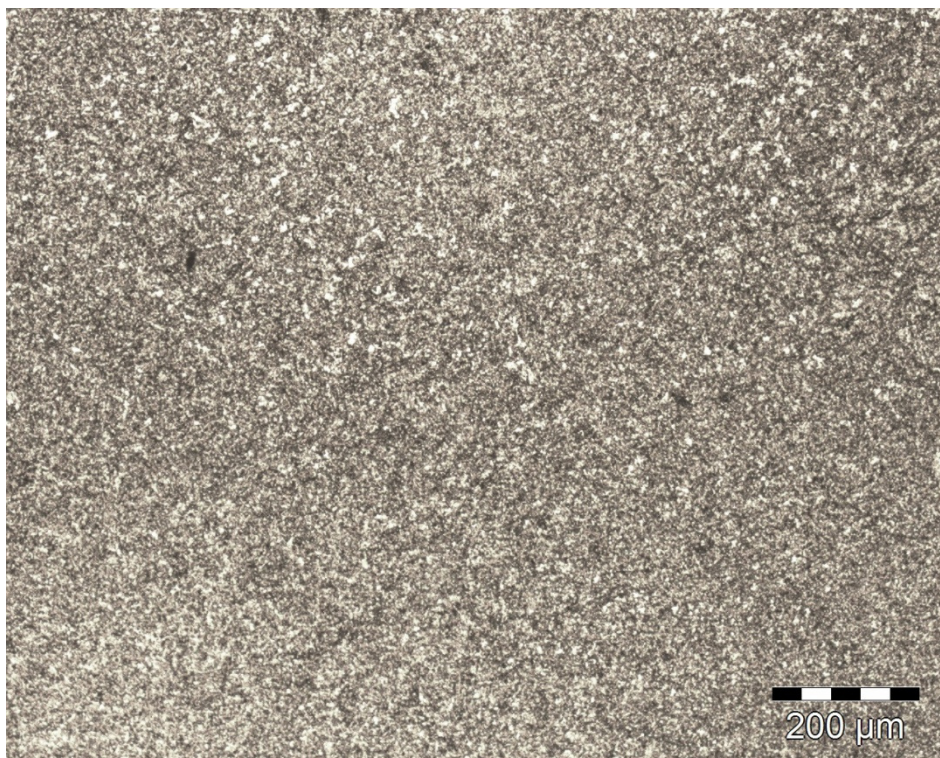


Figura 45 – Imagem da amostra a 650 m da costa, ampliada 50x



Fonte: próprio autor.

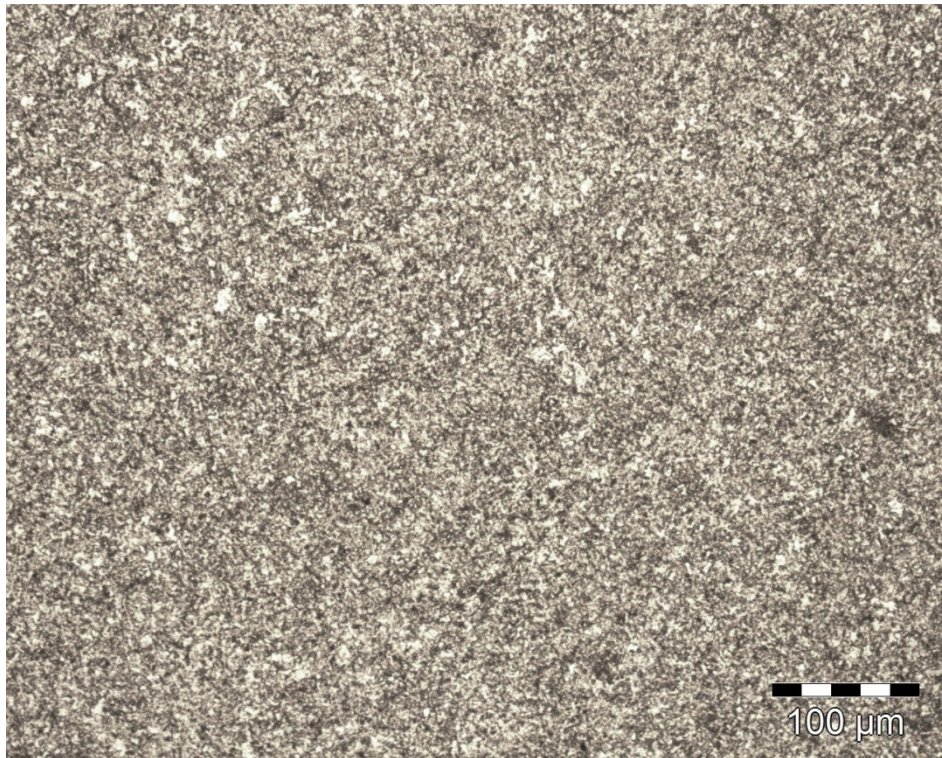
Figura 46 – Imagem da amostra a 650 m da costa, ampliada 100x



Fonte: próprio autor.

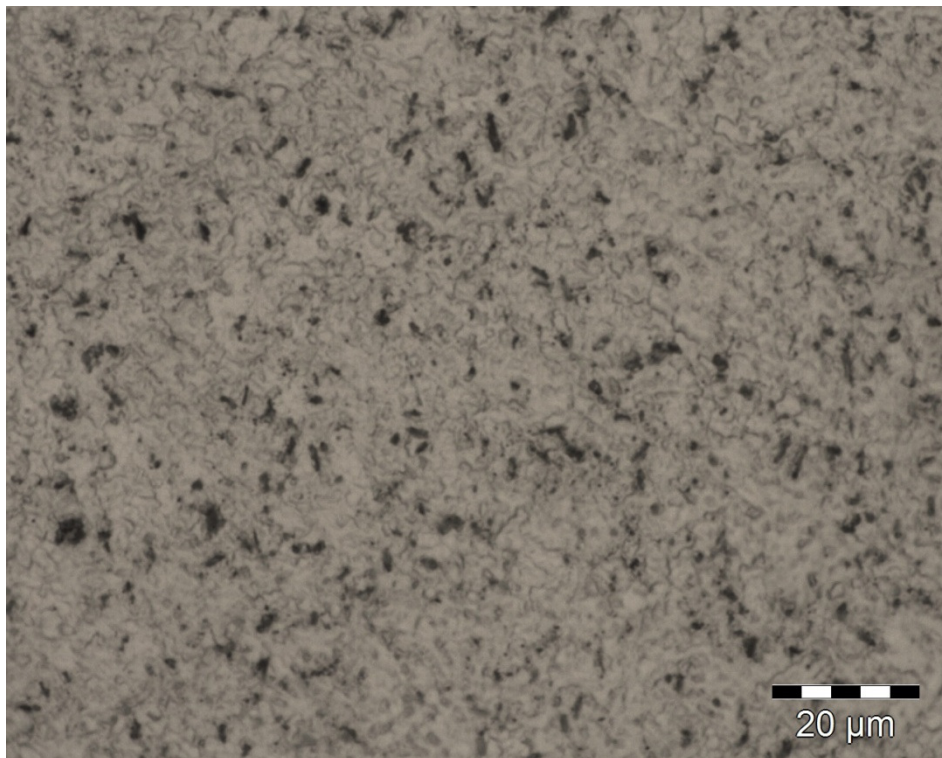


Figura 47 – Imagem da amostra a 650 m da costa, ampliada 200x



Fonte: próprio autor.

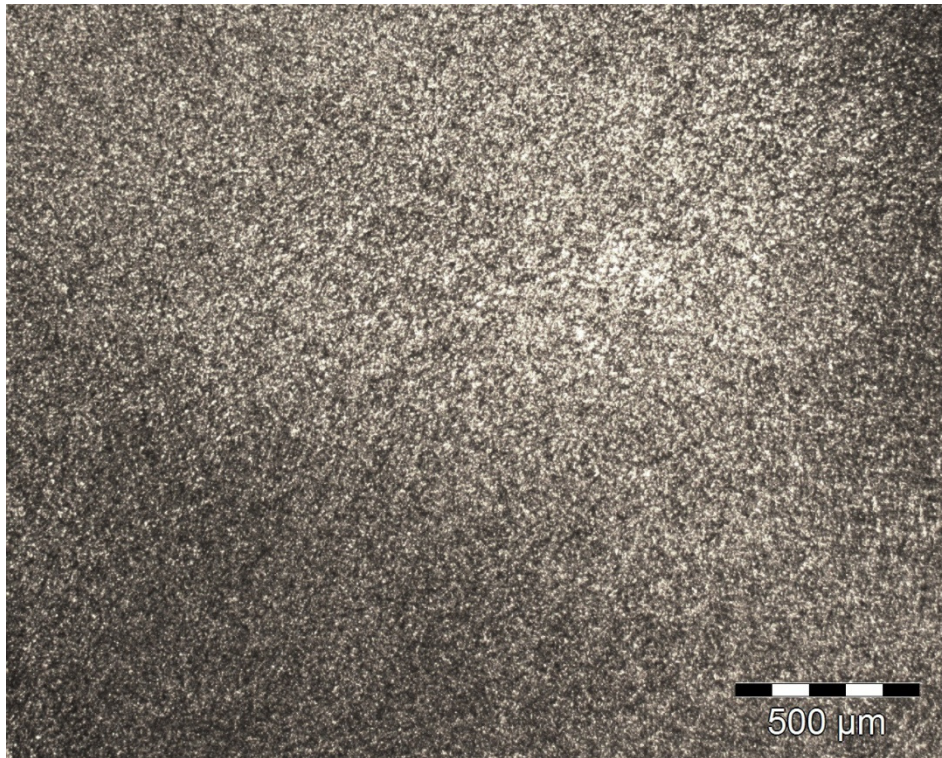
Figura 48 – Imagem da amostra a 650 m da costa, ampliada 1000x



Fonte: próprio autor.

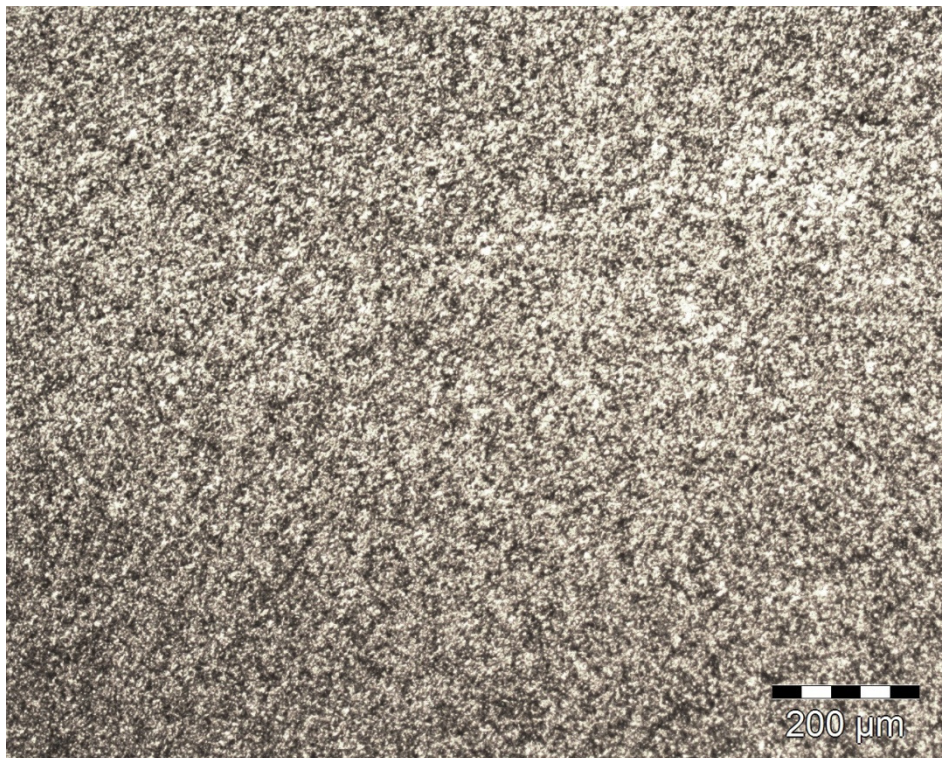


Figura 49 – Imagem da amostra a 1.550 m da costa, ampliada 50x



Fonte: próprio autor.

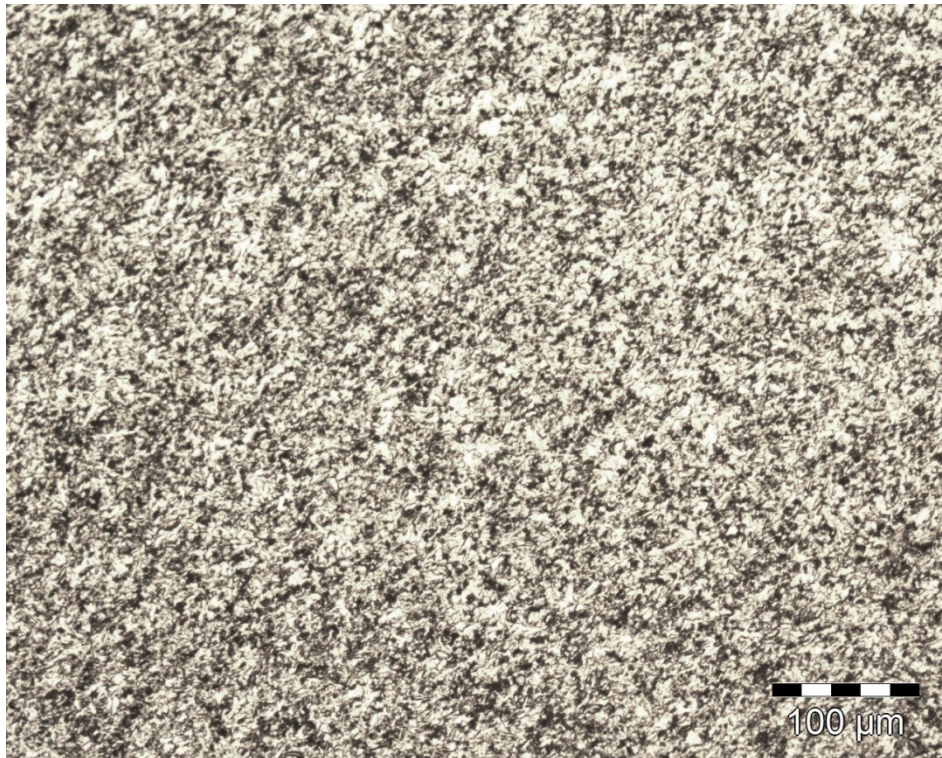
Figura 50 – Imagem da amostra a 1.550 m da costa, ampliada 100x



Fonte: próprio autor.

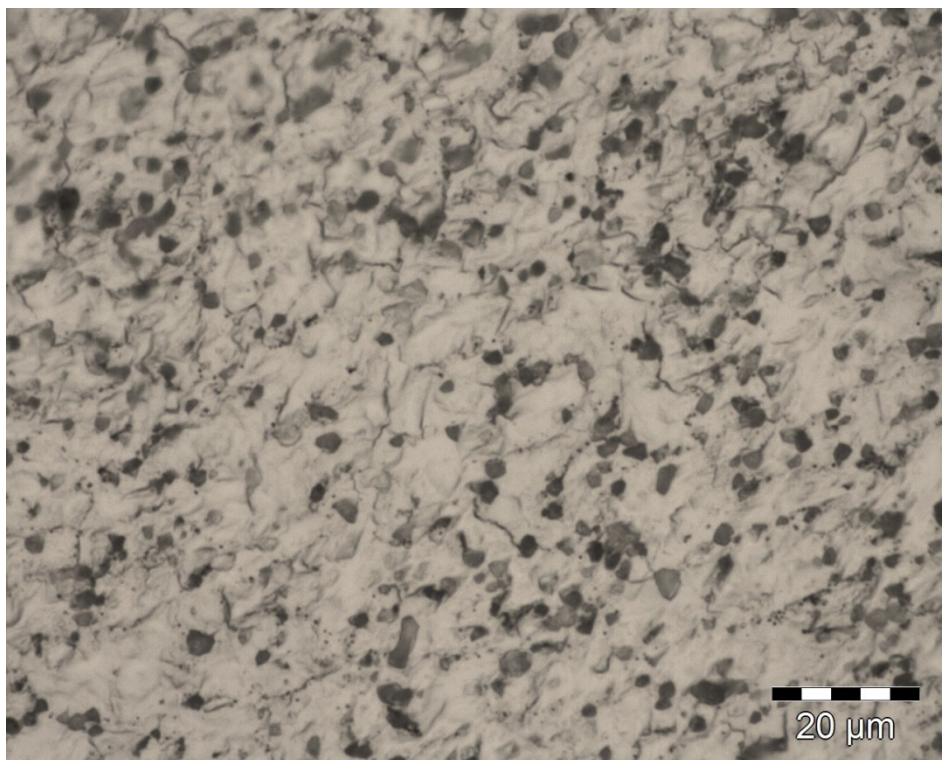


Figura 51 – Imagem da amostra a 1.550 m da costa, ampliada 200x



Fonte: próprio autor.

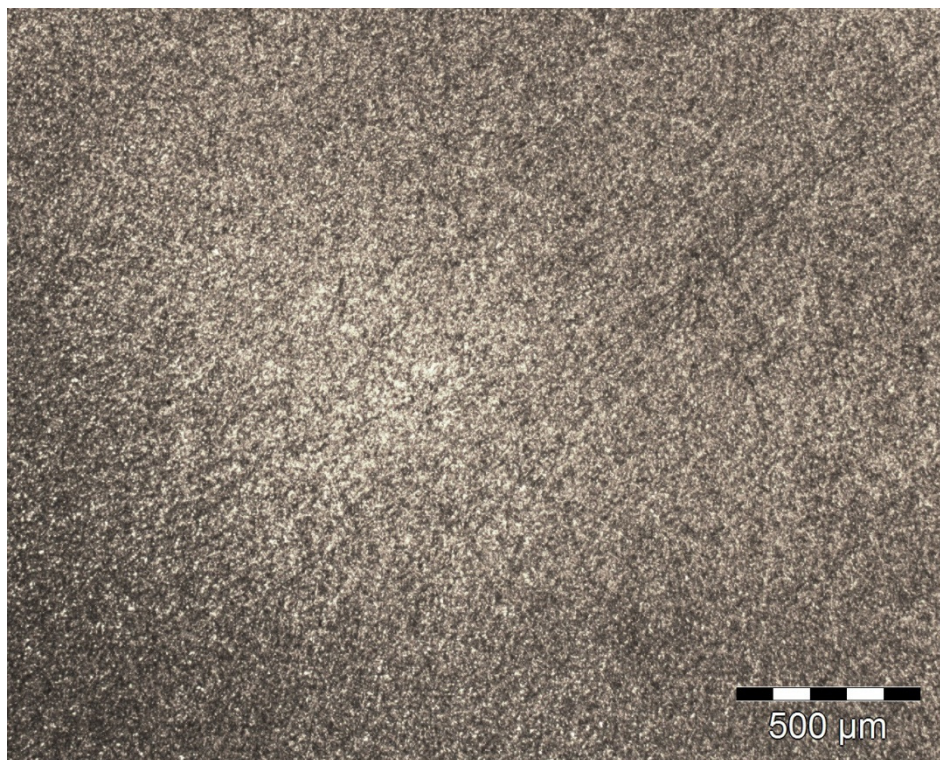
Figura 52 – Imagem da amostra a 1.550 m da costa, ampliada 1000x



Fonte: próprio autor.

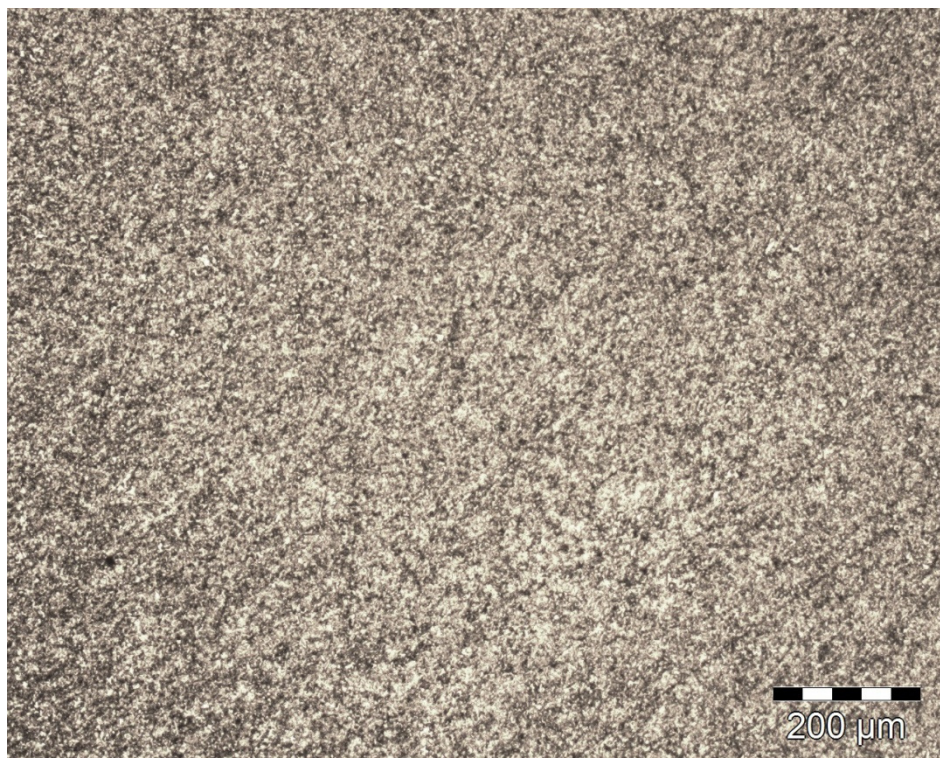


Figura 53 – Imagem da amostra a 3.270 m da costa, ampliada 50x



Fonte: próprio autor.

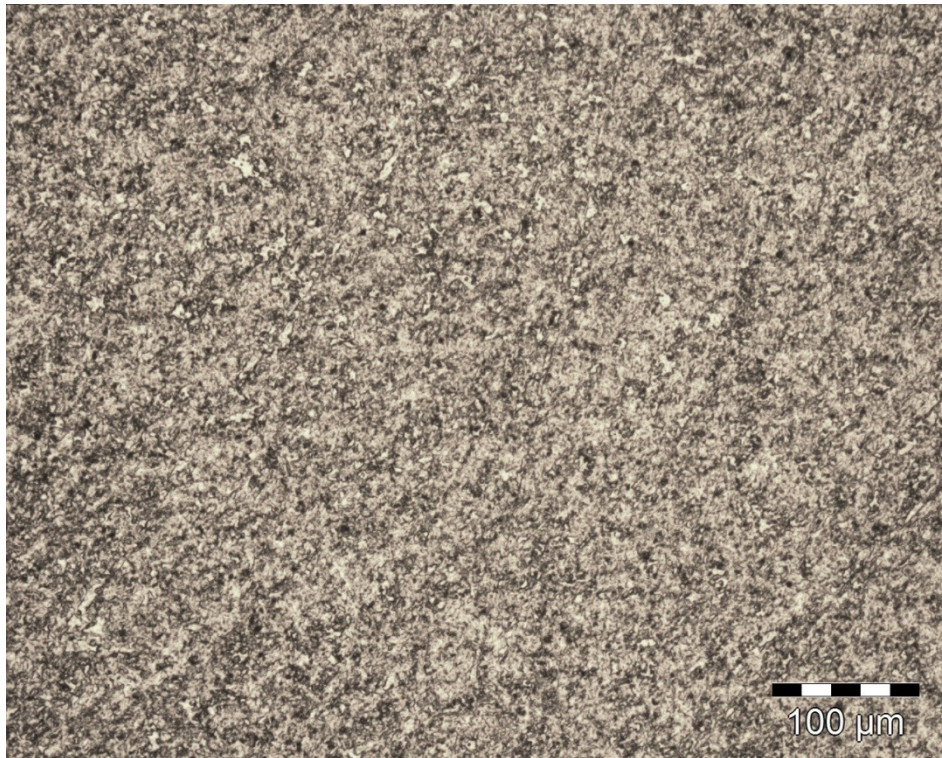
Figura 54 – Imagem da amostra a 3.270 m da costa, ampliada 100x



Fonte: próprio autor.

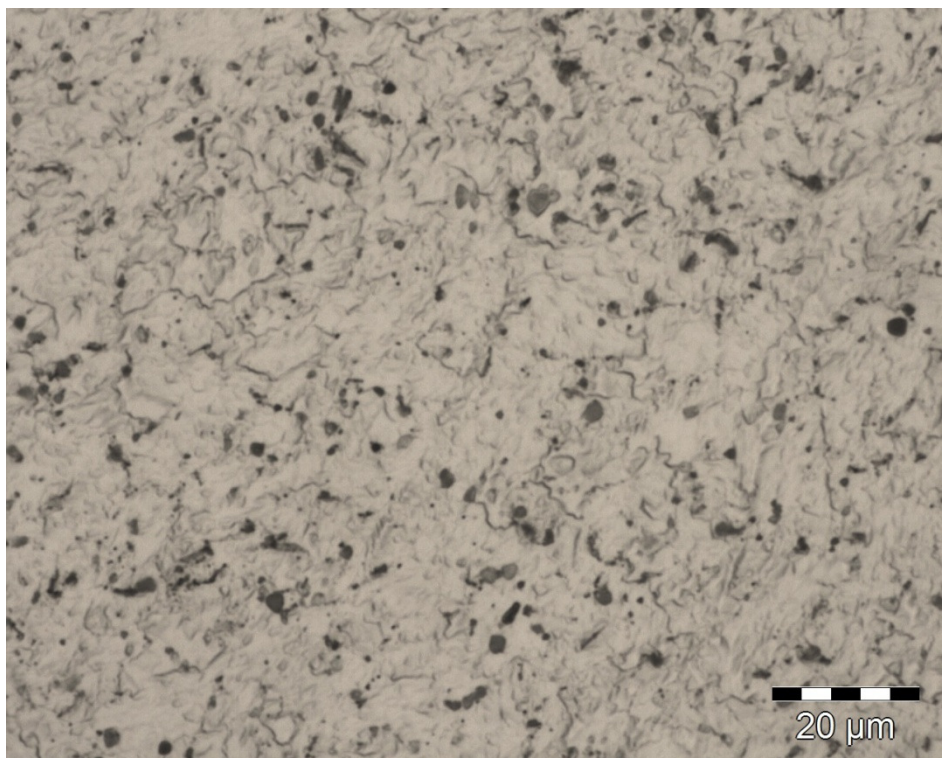


Figura 55 – Imagem da amostra a 3.270 m da costa, ampliada 200x



Fonte: próprio autor.

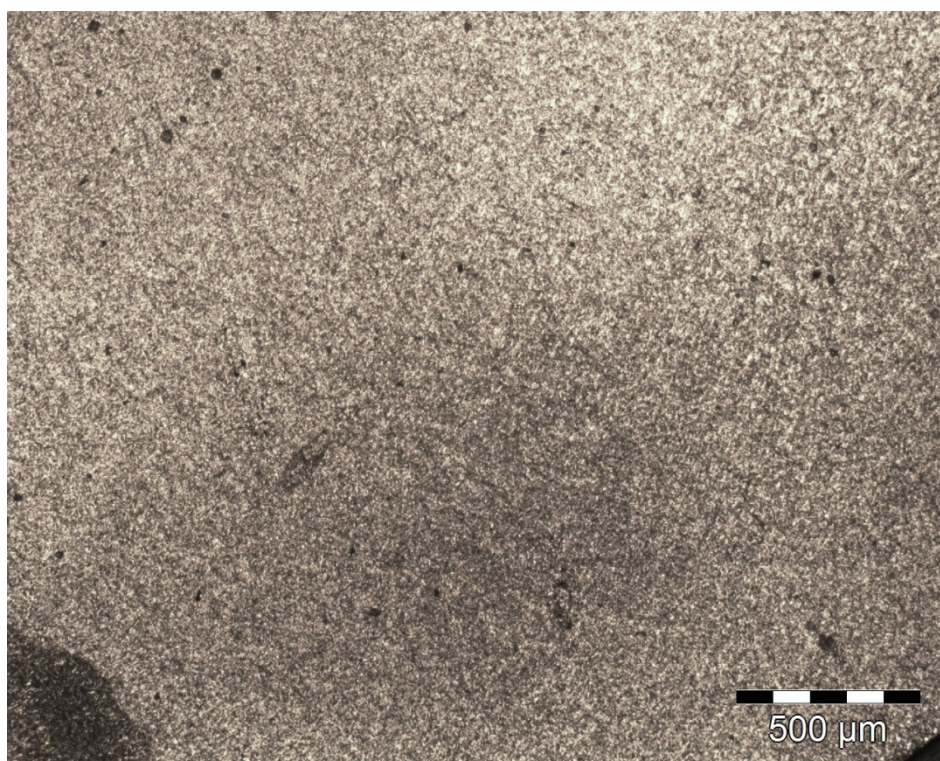
Figura 56 – Imagem da amostra a 3.270 m da costa, ampliada 1000x



Fonte: próprio autor.

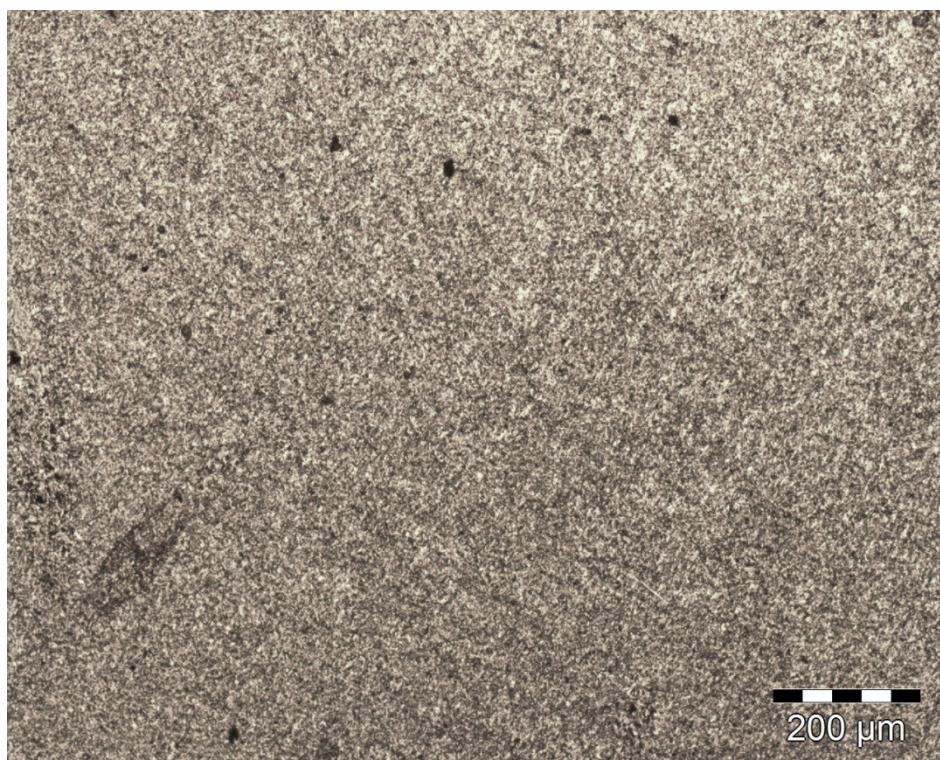


Figura 57 – Imagem da amostra a 4.720 m da costa, ampliada 50x



Fonte: próprio autor.

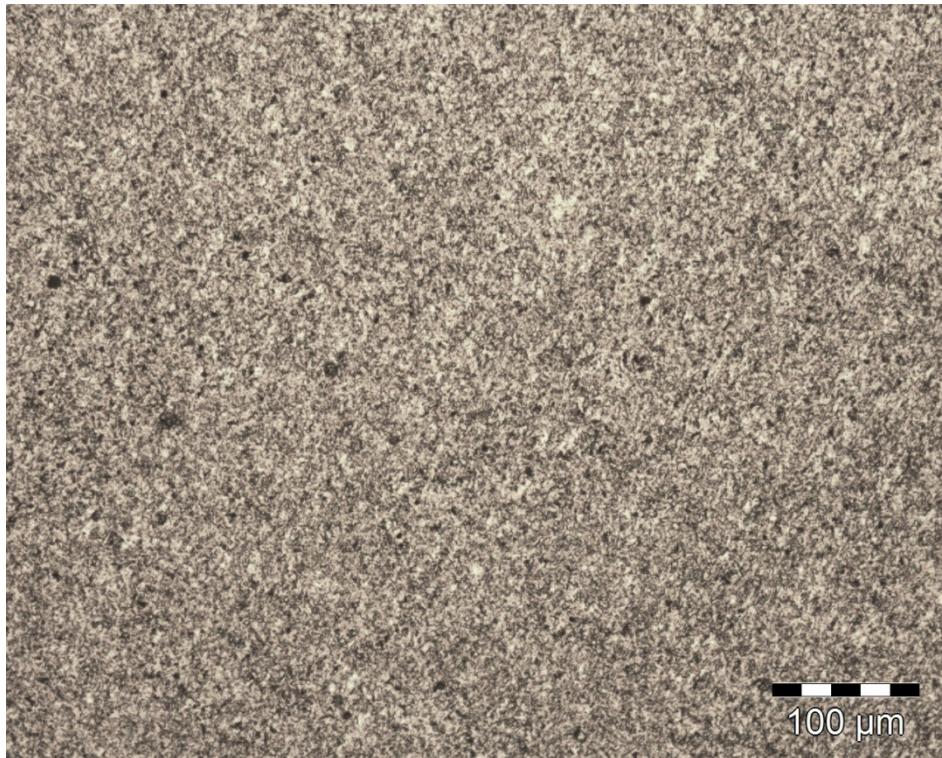
Figura 58 – Imagem da amostra a 4.720 m da costa, ampliada 100x



Fonte: próprio autor.

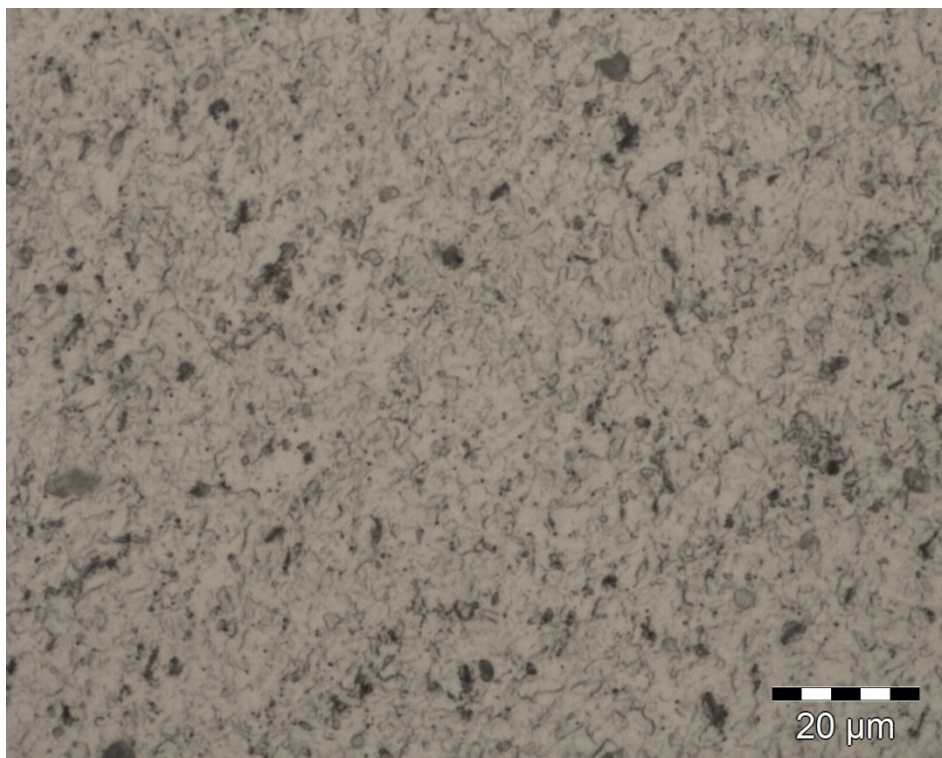


Figura 59 – Imagem da amostra a 4.720 m da costa, ampliada 200x



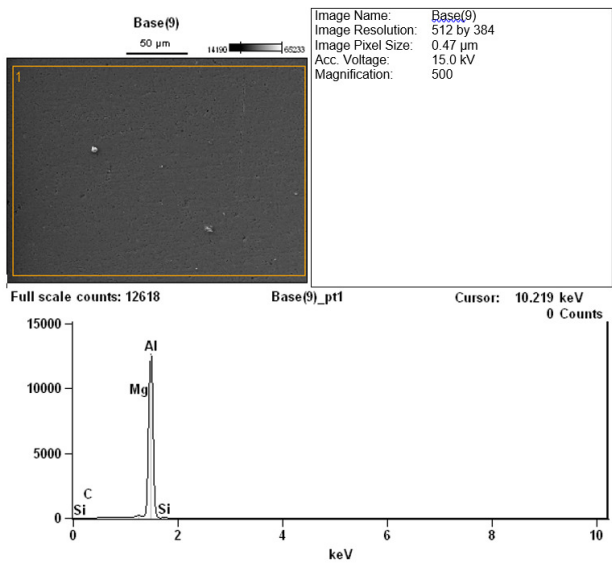
Fonte: próprio autor.

Figura 60 – Imagem da amostra a 4.720 m da costa, ampliada 1000x



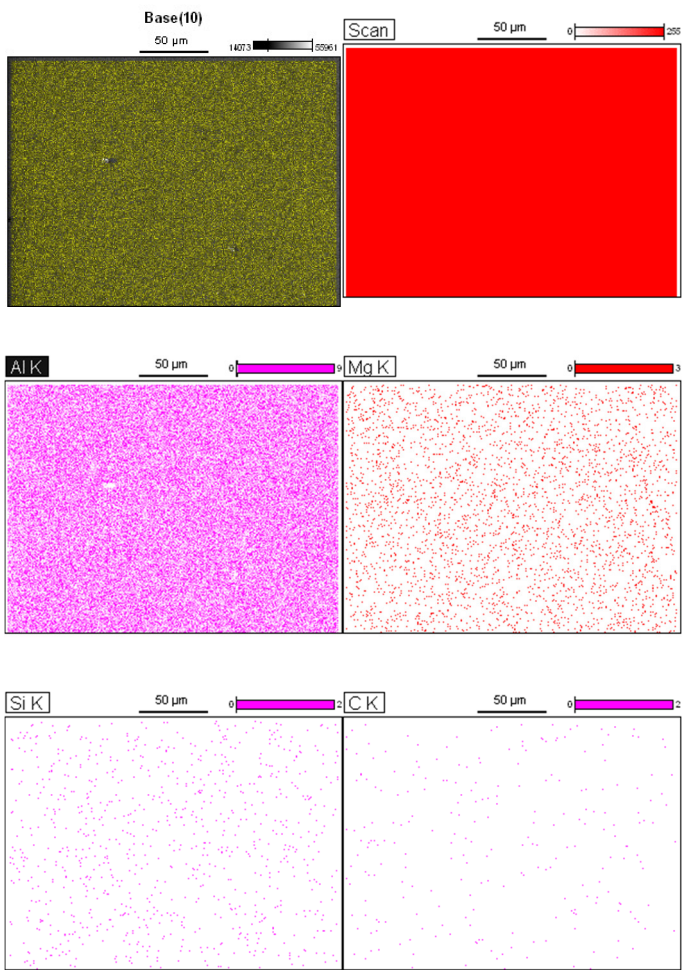
Fonte: próprio autor.

Figura 61 – MeV da amostra a 1.550 m da costa



Fonte: próprio autor.

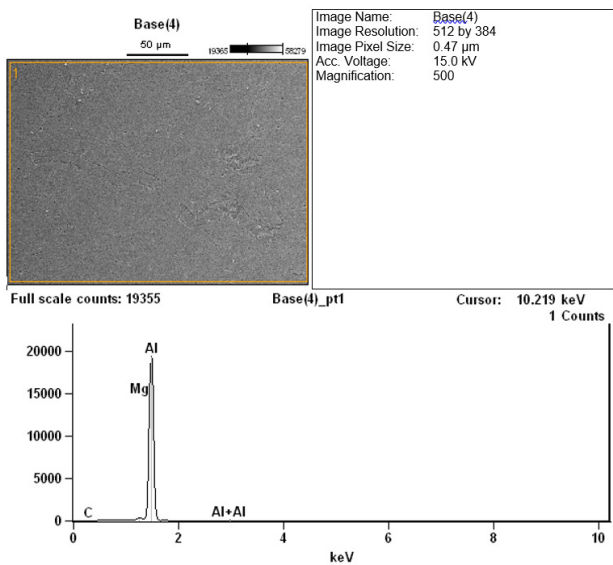
Figura 62 – Formação da imagem através dos filtros dos elementos amostra a 1.550 m



Fonte: próprio autor.

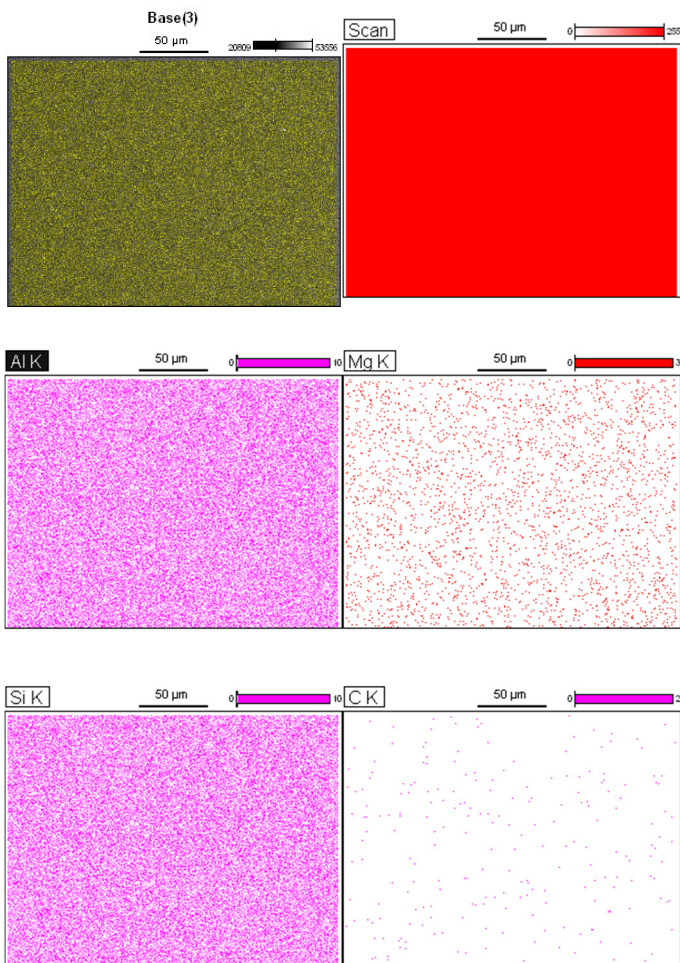


Figura 63 – MeV da amostra a 3.270 m da costa



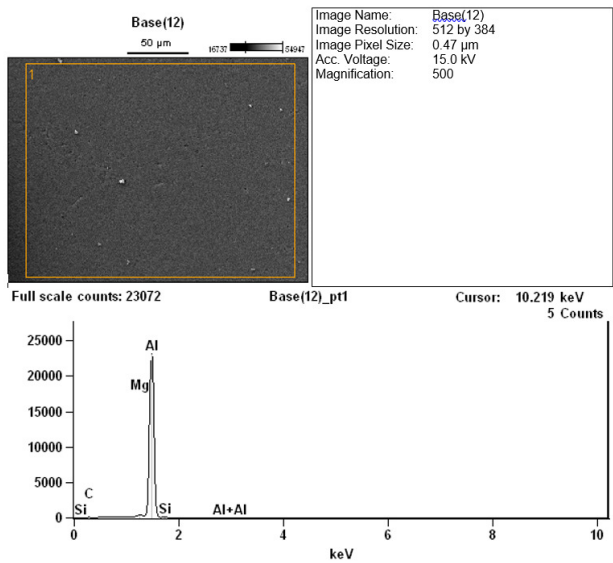
Fonte: próprio autor.

Figura 64 – Formação da imagem através dos filtros dos elementos amostra a 3.270 m



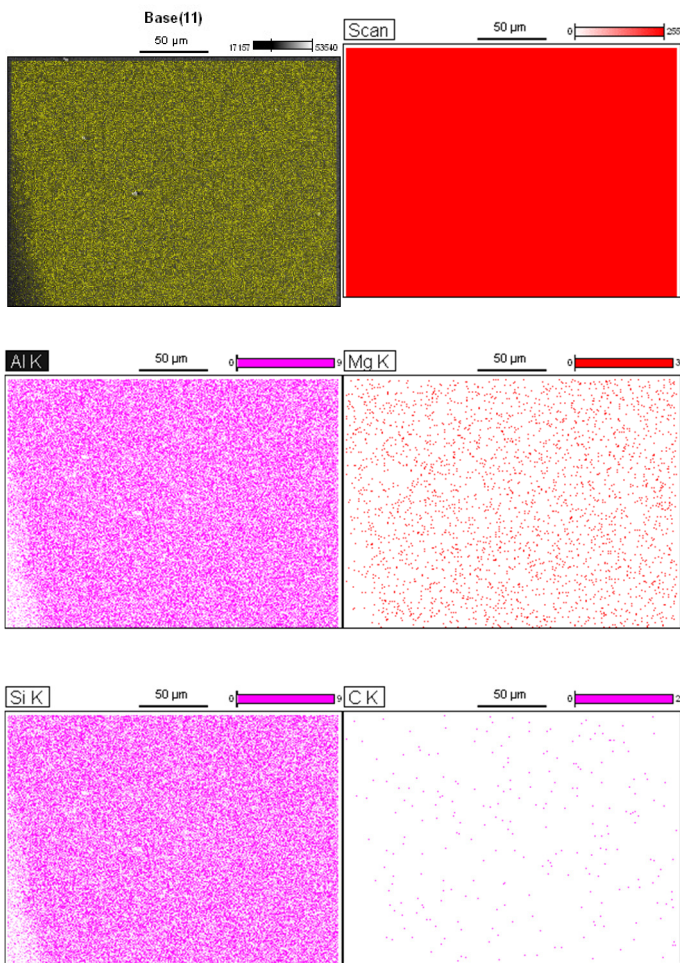
Fonte: próprio autor.

Figura 65 – MeV da amostra a 4.720 m da costa



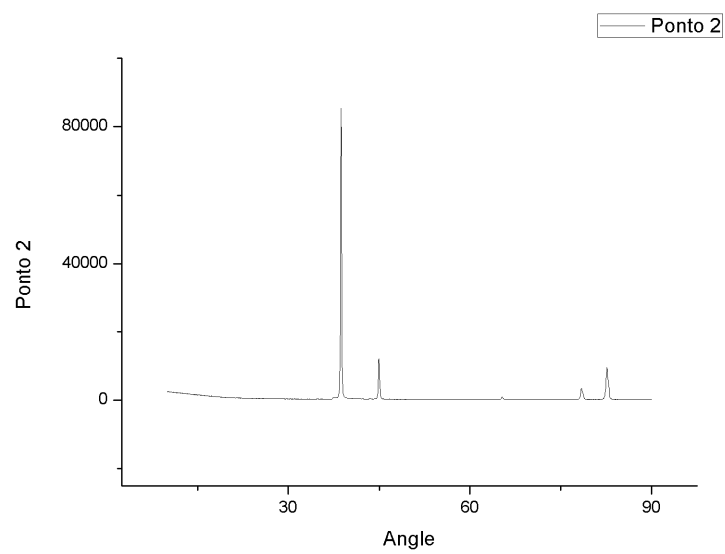
Fonte: próprio autor.

Figura 66 – Formação da imagem através dos filtros dos elementos amostra a 4.720 m



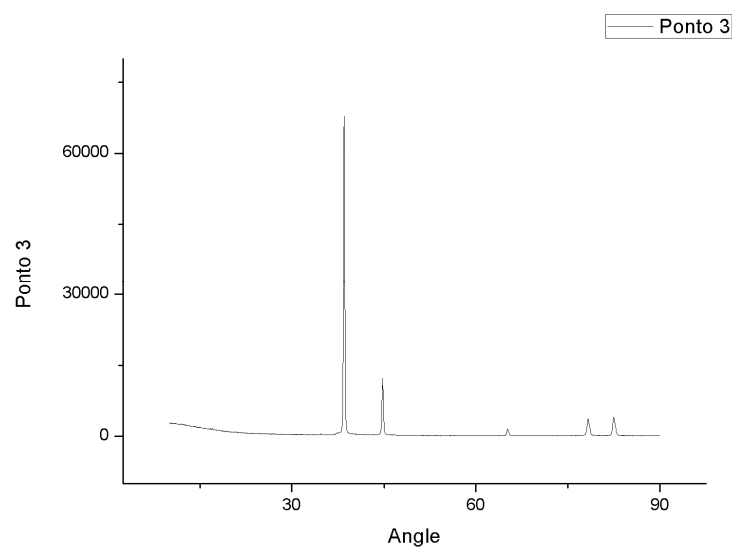
Fonte: próprio autor.

Figura 67 – Difratrograma da amostra a 1.550 m da costa



Fonte: próprio autor.

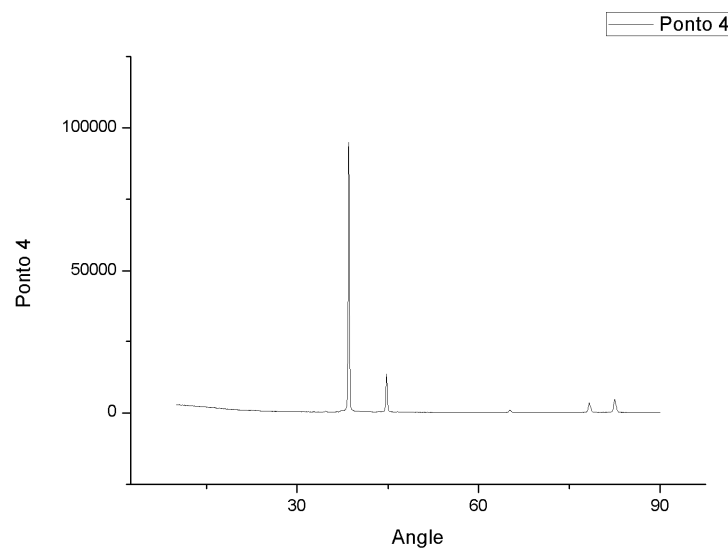
Figura 68 – Difratrograma da amostra a 3.270 m da costa



Fonte: próprio autor.

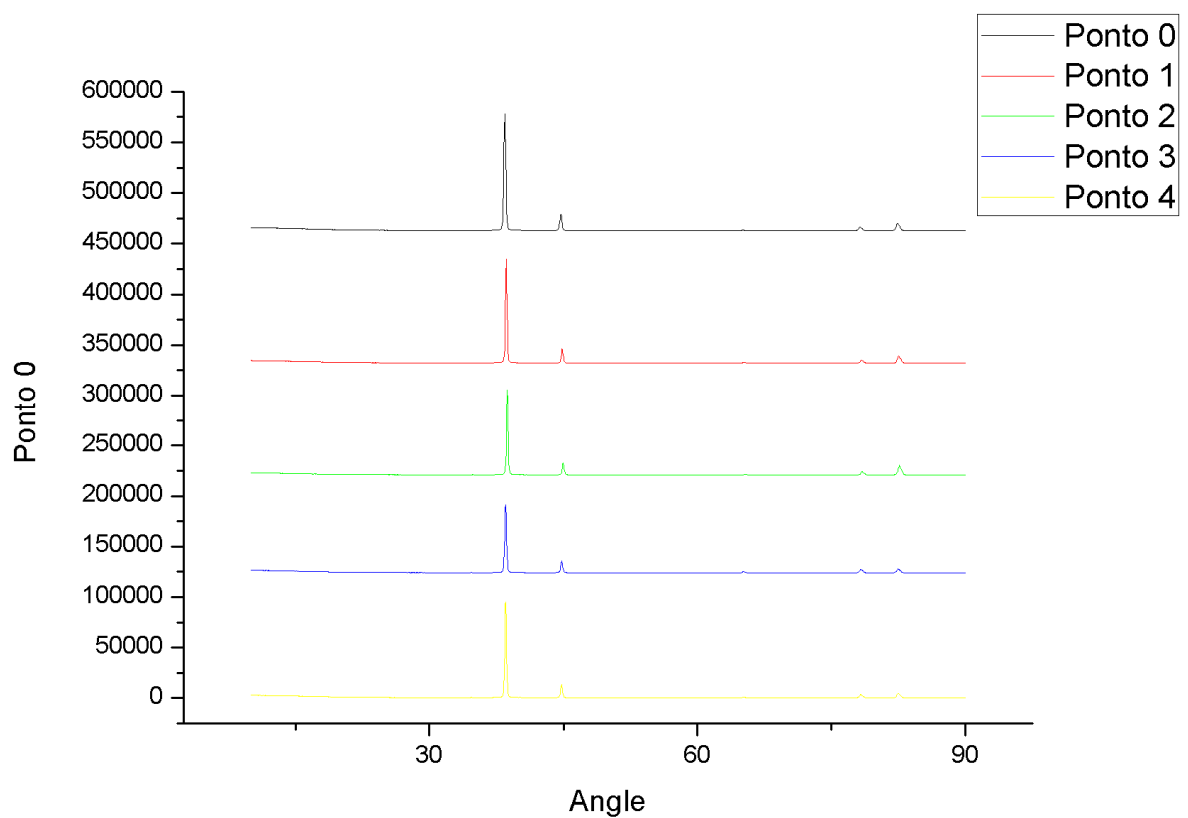


Figura 69 – Difratrograma da amostra a 4.720 m da costa



Fonte: próprio autor.

Figura 70 – Difratrograma de todas as amostras da liga AL 6201



Fonte: próprio autor.