



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS**

**WILSON SALES SILVA FILHO**

**GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO EM MATERIAIS METÁLICOS POR**  
**CRONOAMPEROMETRIA: AVALIAÇÃO ENERGÉTICA E ECONÔMICA**

**FORTALEZA**

**2025**

WILSON SALES SILVA FILHO

Geração de Hidrogênio em Materiais Metálicos por Cronoamperometria: Avaliação  
Energética e Econômica

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia de  
Energias Renovável do Centro de Tecnologias  
da Universidade Federal do Ceará, como  
requisito parcial à obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia de Energias  
Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Mauro Andres Cerra  
Florez

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- 
- F498g Silva Filho, Wilson Sales.  
Geração de hidrogênio em materiais metálicos por cronoamperometria : avaliação energética e econômica / Wilson Sales Silva Filho. – 2025.  
79 f.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Fortaleza, 2025.  
Orientação: Prof. Dr. Mauro Andres Cerra Florez.
1. Hidrogenação eletrolítica. 2. Cronoamperometria. 3. Produção de hidrogênio. 4. Eficiência energética.  
5. Materiais metálicos. I. Título.

CDD 621.042

---

WILSON SALES SILVA FILHO

Geração de Hidrogênio em Materiais Metálicos por Cronoamperometria: Avaliação  
Energética e Econômica

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia de  
Energias Renováveis do Centro de Tecnologias  
da Universidade Federal do Ceará, como  
requisito parcial à obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia de Energias  
Renováveis.

Aprovado em: 23/07/2025.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Mauro Andres Cerra Florez (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dra. Fernanda Leite Lobo  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Me. Franceleno Silva Pereira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)



Dedico este trabalho a Deus, pela sabedoria e força em cada etapa, e à minha família, por todo o apoio e amor incondicional. Que esta jornada na Engenharia de Energias Renováveis represente o início de um caminho guiado por propósito e transformação.

## AGRADECIMENTOS

Durante o meu processo de formação como engenheiro de energias renováveis na Universidade Federal do Ceará acabei desenvolvendo não apenas conhecimentos essenciais na minha formação, mas encontrei, também, o meu propósito e a minha motivação para acordar todos os dias, que é a vontade de tornar o mundo um lugar mais sustentável.

Inicialmente, agradeço aos meus pais que sempre estiveram comigo durante toda a minha trajetória, me dando suporte e apoios em todos os momentos em que precisei. Eles são a minha fortaleza e sempre me ajudam e apoiam a passar por momentos desafiadores durante a minha vida.

Agradeço também aos meus avós, que, por mais distantes que estejam, são uma das minhas maiores inspirações de como enxergar a vida de uma forma mais simples e de que a felicidade está nas pequenas coisas.

Ao Prof. Dr. Mauro Andres Cerra Florez, agradeço de forma imensurável por toda orientação, apoio e ideias que foram essenciais para a realização desse trabalho. Agradeço também a Ana Aline, que com a sua paciência e conhecimentos, me auxiliou imensamente com meu trabalho e com os ensaios eletroquímicos.

A Professora Fernanda Leite Lobo e ao Franceleno Silva Pereira, membros da banca examinadora de TCC, pelas valiosas contribuições ao meu trabalho.

Agradeço também aos professores da instituição Universidade Federal do Ceará pelos seus ensinamentos, não apenas no âmbito acadêmico e profissional, mas também em outros aspectos da vida, sem esses mestres a minha formação como engenheiro de energias renováveis não seria possível.

Agradeço profundamente aos meus colegas do Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM) e do Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC) por toda a assistência nas fases de preparação das amostras e pela cooperação contínua.

Por fim, deixo minha gratidão aos meus amigos Arthur, Davi, Eduarda, Gilberto, Lucas e Lutécio que, com apoio, incentivo e amizade, tornaram essa caminhada mais leve e significativa. Cada um, à sua maneira, contribuiu para que essa jornada no ensino superior fosse possível e repleta de boas lembranças.

"O futuro pertence àqueles que acreditam na  
beleza dos seus sonhos."

(Eleanor Roosevelt)

## RESUMO

A produção de hidrogênio molecular por processos eletroquímicos tem se destacado como uma alternativa estratégica diante da crescente demanda por soluções energéticas limpas e sustentáveis. Este trabalho teve como objetivo investigar a geração de hidrogênio por hidrogenação eletrolítica utilizando a técnica de cronoamperometria em solução de NaCl 3,5% (m/v), avaliando a influência do tempo de ensaio (1h e 3h) sobre a eficiência eletroquímica e o consumo energético de diferentes materiais metálicos. A motivação central do estudo está relacionada à necessidade de selecionar materiais mais eficientes e economicamente viáveis para aplicação em processos industriais de eletrólise, especialmente em regiões com ampla presença de fontes renováveis na matriz elétrica, como no Nordeste brasileiro. Os ensaios experimentais foram conduzidos exclusivamente com a liga de alumínio-silício AISI 360.X, cujos resultados foram comparados a dados prévios obtidos sob as mesmas condições para aços carbono, inoxidáveis, maraging e especiais. A produção de hidrogênio foi quantificada pela Lei de Faraday, com normalização dos dados por resistência elétrica para garantir comparações justas. A AISI 360.X apresentou a maior produção específica de hidrogênio e o menor custo por  $\text{cm}^2$ , mesmo com o maior consumo energético, destacando-se como uma das opções mais competitivas tecnicamente e economicamente. Outros materiais, como os aços carbono, também apresentaram desempenho favorável quando analisados sob o aspecto do custo-benefício. Os resultados reforçam a importância da composição química, da condutividade elétrica e da microestrutura na seleção de materiais para tecnologias de geração de hidrogênio.

**Palavras-chave:** Hidrogenação eletrolítica; Cronoamperometria; Produção de hidrogênio; Eficiência energética; Materiais metálicos.

## ABSTRACT

The production of molecular hydrogen through electrochemical processes has emerged as a strategic alternative in response to the growing demand for clean and sustainable energy solutions. This study aimed to investigate hydrogen generation via electrolytic hydrogenation using the chronoamperometry technique in a 3.5% (w/v) NaCl solution, assessing the influence of test duration (1h and 3h) on the electrochemical efficiency and energy consumption of different metallic materials. The core motivation lies in the need to identify more efficient and economically viable materials for industrial electrolysis applications, especially in regions with a strong presence of renewable energy sources in the power grid, such as in northeastern Brazil. The experimental procedures were conducted exclusively with the aluminum-silicon alloy AISI 360.X, and the results were compared with previously obtained data for carbon steels, stainless steels, maraging steels, and special alloys, under identical electrochemical conditions. Hydrogen production was quantified using Faraday's Law, and the data were normalized based on electrical resistance to ensure fair comparisons. The AISI 360.X alloy showed the highest specific hydrogen production and the lowest cost per cm<sup>2</sup>, despite its higher energy consumption, standing out as one of the most technically and economically competitive options. Other materials, such as carbon steels, also exhibited favorable performance when evaluated from a cost-benefit perspective. The results highlight the importance of chemical composition, electrical conductivity, and microstructure in selecting materials for hydrogen generation technologies.

**Keywords:** Electrolytic hydrogenation; Chronoamperometry; Hydrogen production; Energy efficiency; Metallic materials.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Esquema geral do processo de eletrólise da água com liberação de H <sub>2</sub> e O <sub>2</sub> .....	20
Figura 2 –	Comparativo esquemático entre as tecnologias de eletrólise da água .....	22
Figura 3 –	Produção do H <sub>2</sub> V no Pecém (representação) .....	23
Figura 4 –	Diagrama de Schaeffler .....	27
Figura 5 –	S1 TITAN utilizado no experimento .....	36
Figura 6 –	Organograma da metodologia do projeto .....	38
Figura 7 –	Serra Fita .....	39
Figura 8 –	Politriz Lixadeira Metalográfica .....	40
Figura 9 –	Peça entalhada e embutida .....	41
Figura 10 –	Balança analítica Shimadzu .....	42
Figura 11 –	Representação esquemática do ensaio eletroquímico .....	43
Figura 12 –	Configuração experimental para o ensaio de cronoamperometria .....	44
Figura 13 –	Microscópio óptico para caracterização morfológica .....	47
Figura 14 –	Witec Alpha 300 .....	48
Figura 15 –	Monitoramento do potencial de circuito aberto com o tempo (a) e curva de polarização catódica (b) para a liga AISI 360.X, em meio de NaCl 3,5 % .....	50
Figura 16 –	Cronoamperogramas da liga AISI 360.X, em meio de NaCl 3,5 %, obtidos em E= -2,50 V por 3600 s .....	51
Figura 17 –	Cronoamperogramas da liga AISI 360.X, em meio de NaCl 3,5 %, obtidos em E= -2,50 V por 10800 s .....	51
Figura 18 –	Subproduto do processo de cronoamperometria .....	52
Figura 19 –	Micrografias ópticas da amostra A1 (1h) antes da cronoamperometria: (a) 5x; (b) 10x; (c) 20x; (d) 50x. ....	65
Figura 20 –	Micrografias ópticas da amostra A4 (3h) antes da cronoamperometria: (a) 5x; (b) 10x; (c) 20x; (d) 50x. ....	66
Figura 21 –	Micrografias ópticas da amostra A1 (1h) após a cronoamperometria: (a) 5x; (b) 10x; (c) 20x; (d) 50x. ....	67
Figura 22 –	Micrografias ópticas da amostra A4 (3h) após a cronoamperometria: (a) 5x; (b) 10x; (c) 20x; (d) 50x. ....	68

Figura 23 – Análise Raman da amostra A5 (3h) após a cronoamperometria: (a) R1;  
(b) R2; (c) R3; (d) R4. .... 69

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 –	Quantidade de hidrogênio produzida por material (1 hora).....	54
Gráfico 2 –	Quantidade de hidrogênio produzida por material (3 horas).....	54
Gráfico 3 –	Comparação da Produção de Hidrogênio para 1 Hora e 3 Horas.....	55
Gráfico 4 –	Custo de produção por 1 hora ( $\text{R\$} \times 10^{-5}/\text{cm}^2$ ).....	56
Gráfico 5 –	Custo de produção por 3 horas ( $\text{R\$} \times 10^{-5}/\text{cm}^2$ ).....	58
Gráfico 6 –	Comparação do Custo de produção para 1h e 3h ( $\text{R\$} \times 10^{-5}/\text{cm}^2$ ).....	58
Gráfico 7 –	Produção de $\text{H}_2$ por material para 1h e 3h (normalizado).....	60
Gráfico 8 –	Custo de produção para 1h e 3h (normalizado) ( $\text{R\$} \times 10^{-5}/\text{cm}^2$ ).....	60
Gráfico 9 –	Representação gráfica do preço por $\text{cm}^2$ dos materiais testados.....	63
Gráfico 10 –	Espectro Raman de A5 nas regiões R1, R3 e R4.....	70



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Composição Química do Aço SAE 1008 (SAE J403).....	32
Tabela 2 –	Composição química do Maraging 300 modificado com Nb e faixa da norma SAE AMS 6514G .....	35
Tabela 3 –	Composição química da liga AISI 360.X, porcentagem em peso (%p).....	37
Tabela 4 –	Comparativo dos valores médios para quantidade de hidrogênio produzido na superfície da liga AISI 360.X para os tempos de 1 e 3 horas de hidrogenação eletrolítica .....	52
Tabela 5 –	Condutividade elétrica de elementos metálicos relevantes (MS/m).....	56
Tabela 6 –	Preço por cm <sup>2</sup> dos materiais testados e suas respectivas fontes.....	62

## **LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS**

ABB	Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologia
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATI	Allegheny Technologies Incorporated
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CFC	Cúbica de Face Centrada
CP	Corpo de Prova
DEMM	Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
LACAM	Laboratório de Caracterização de Materiais
LEM	Laboratório de Ensaios Mecânicos
LPC	Laboratório de Pesquisa em Corrosão
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
OCP	Open Circuit Potential (Potencial de Circuito Aberto)
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
SAE	Society of Automotive Engineers
UFC	Universidade Federal do Ceará

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da superfície do eletrodo
cm <sup>2</sup>	Centímetro quadrado
NaCl	Cloreto de Sódio
F	Constante de Faraday
I	Corrente elétrica
J	Densidade de corrente
e <sup>-</sup>	Elétron
E	Energia consumida
°C	Grau Celsius
H <sub>ads</sub>	Hidrogênio adsorvido
H <sub>abs</sub>	Hidrogênio absorvido
H <sup>+</sup>	Hidrogênio molecular
H <sub>2</sub>	Íon hidrogênio
H <sub>2</sub> V	Hidrogênio Verde
OH <sup>-</sup>	Íon hidroxila
J	Joule
mol	Mol (quantidade de substância)
Pt	Platina
%	Porcentagem
MS	Megasiemens
Q	Quantidade de hidrogênio produzida
R	Resistência elétrica
kWh	Quilowatt-hora
t	Tempo
V	Potencial aplicado

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo Geral</b>	<b>17</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>18</b>
<b>3.1</b>	<b>Hidrogenação Eletrolítica</b>	<b>18</b>
<b>3.1.1</b>	<i>Fundamentos Eletroquímicos</i>	<b>18</b>
<b>3.1.2</b>	<i>Quantificação da Absorção de Hidrogênio</i>	<b>19</b>
<b>3.2</b>	<b>Eletrólise da Água</b>	<b>19</b>
<b>3.2.1</b>	<i>Eletrólise e Cronoamperometria</i>	<b>20</b>
<b>3.2.2</b>	<i>Tecnologias Comerciais de Eletrólise</i>	<b>21</b>
<b>3.2.3</b>	<i>Aplicações Industriais na Transição Energética</i>	<b>22</b>
<b>3.3</b>	<b>Liga Al-Si-Cu-Mn (360.X)</b>	<b>23</b>
<b>3.4</b>	<b>Aços Inoxidáveis</b>	<b>25</b>
<b>3.4.1</b>	<i>Aços Ferríticos</i>	<b>27</b>
<b>3.4.2</b>	<i>Aços Martensíticos</i>	<b>28</b>
<b>3.4.3</b>	<i>Aços Austeníticos</i>	<b>29</b>
<b>3.4.3.1</b>	<i>Aços Superausteníticos</i>	<b>31</b>
<b>3.5</b>	<b>Aços Carbonos</b>	<b>31</b>
<b>3.6</b>	<b>Aços Maraging</b>	<b>33</b>
<b>3.6.1</b>	<i>Efeito do Nb nos Aços Maraging</i>	<b>34</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>36</b>
<b>4.1</b>	<b>Material em Estudo e Composição Química</b>	<b>36</b>
<b>4.2</b>	<b>Metodologia</b>	<b>37</b>
<b>4.2.1</b>	<i>Preparação dos corpos de prova</i>	<b>38</b>
<b>4.2.2</b>	<i>Ensaio eletroquímico</i>	<b>40</b>
<b>4.2.2.1</b>	<i>Ensaio de OCP e Polarização Catódica</i>	<b>41</b>
<b>4.2.2.2</b>	<i>Cronoamperometria</i>	<b>43</b>
<b>4.2.3</b>	<i>Energia Produzida e Custo de Produção</i>	<b>44</b>
<b>4.2.4</b>	<i>Caracterização morfológica</i>	<b>47</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>49</b>

<b>5.1</b>	<b>Hidrogenação eletrolítica do AISI 360.X .....</b>	<b>49</b>
<b>5.2</b>	<b>Quantidade de Hidrogênio Produzido na Superfície dos Materiais.....</b>	<b>53</b>
<b>5.3</b>	<b>Custo de Produção e Normalização dos Dados .....</b>	<b>57</b>
<b>5.4</b>	<b>Preço dos Materiais e sua Influência na Análise .....</b>	<b>61</b>
<b>5.5</b>	<b>Análise Morfológica .....</b>	<b>64</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>72</b>
	<b>Sugestões para Trabalhos Futuros .....</b>	<b>74</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>75</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por fontes de energia limpas, seguras e sustentáveis tem impulsionado transformações na matriz energética global. Entre as alternativas tecnológicas promissoras, o hidrogênio destaca-se como vetor energético estratégico, devido à sua alta densidade energética e à conversão limpa em energia, sem emissão de dióxido de carbono (ZHANG et al., 2024). No entanto, seu aproveitamento em larga escala depende de soluções técnicas e econômicas viáveis para produção, armazenamento, transporte e aplicação.

A eletrólise da água alimentada por fontes renováveis, como solar e eólica, surge como uma das rotas mais sustentáveis para a produção do chamado hidrogênio verde. No Brasil, o estado do Ceará tem se consolidado como polo estratégico na transição energética, com destaque para o projeto de Hidrogênio Verde no Complexo Industrial e Portuário do Pecém (SERPA, 2025).

A região Nordeste, onde se insere o estado do Ceará, destaca-se nacionalmente por sua elevada presença de fontes renováveis na matriz elétrica. Em 2023, a geração eólica na região alcançou um marco expressivo ao suprir integralmente sua demanda energética e ainda exportar 38,1% da energia gerada para outras regiões do Sistema Interligado Nacional (SIN), operando com um fator de capacidade de 50,68% (ONS, 2023). Esse cenário reforça a importância da região como ambiente promissor para o desenvolvimento de tecnologias associadas ao hidrogênio verde, considerando a disponibilidade de energia limpa em larga escala.

Apesar do seu potencial, o hidrogênio apresenta desafios relacionados à sua interação com materiais metálicos, especialmente pela ocorrência da fragilização por hidrogênio, que pode comprometer a integridade estrutural de componentes metálicos ao reduzir sua ductilidade e favorecer trincas (WANG et al., 2013). Assim, torna-se essencial investigar o comportamento de diferentes ligas frente à hidrogenação eletrolítica.

Este trabalho propõe uma análise comparativa da produção e absorção de hidrogênio em diferentes materiais metálicos, incluindo aços carbono, aços inoxidáveis, ligas de alta resistência como os aços maraging, e a liga de alumínio-silício AISI 360.X. Os ensaios foram conduzidos por meio da técnica de cronoamperometria em solução de NaCl 3,5% (m/v), em durações de 1 e 3 horas, acompanhados de caracterização microestrutural por microscopia óptica e estereoscópica.

Além de quantificar a produção de hidrogênio por meio de ensaios de cronoamperometria, este estudo também avalia a eficiência eletroquímica e o consumo energético específico por unidade de área para diferentes materiais metálicos. A análise busca identificar quais ligas apresentam melhor desempenho na geração de  $H_2$ , contribuindo para o desenvolvimento de soluções mais eficientes e tecnicamente viáveis no contexto da economia do hidrogênio.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo geral

Produzir hidrogênio molecular por meio da eletrólise em solução de NaCl 3,5% (m/v), utilizando a técnica de cronoamperometria aplicada a diferentes materiais metálicos, com ênfase na liga de alumínio-silício AISI 360.X, a fim de avaliar como o tempo de hidrogenação, o custo de produção, o custo do material e a composição química influenciam a quantidade de hidrogênio gerado por unidade de área e o consumo energético do processo, diante da crescente demanda por soluções sustentáveis e da necessidade de selecionar materiais mais eficientes e economicamente viáveis para tecnologias de produção de hidrogênio.

### 2.2 Objetivos específicos

- ✓ Investigar o efeito do tempo de hidrogenação eletrolítica (1 e 3 horas) na produção de hidrogênio molecular em uma liga de alumínio, quantificando a concentração gerada por unidade de área com base nos dados obtidos por cronoamperometria
- ✓ Calcular o consumo energético (em kWh por cm<sup>2</sup>) durante o processo eletroquímico para cada tipo de material analisado;
- ✓ Normalizar e comparar a produção de hidrogênio e o consumo energético para a liga de alumínio com os dados disponíveis de experimentos anteriores com diferentes materiais metálicos.
- ✓ Estimar e comparar o custo por unidade de área (R\$/cm<sup>2</sup>) dos materiais metálicos analisados, com base em fontes comerciais e técnicas, avaliando sua influência na análise técnico-econômica final.
- ✓ Relacionar a influência da composição química e microestrutura dos materiais na produção de hidrogênio;



### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 Hidrogenação Eletrolítica

A hidrogenação eletrolítica consiste na introdução controlada de hidrogênio em materiais metálicos por meio de reações eletroquímicas, geralmente utilizando-se a polarização catódica em meios aquosos. Essa técnica é amplamente empregada em ensaios laboratoriais com o objetivo de simular, de forma acelerada e controlada, os efeitos da fragilização por hidrogênio, permitindo o estudo comparativo da resistência de diferentes ligas metálicas ao fenômeno. Segundo Cupertino-Malheiros et al. (2024), esse processo possibilita a absorção de hidrogênio atômico gerado na superfície metálica, reproduzindo com fidelidade as condições que levam à fragilização por hidrogênio em ambientes industriais.

##### 3.1.1 Fundamentos Eletroquímicos

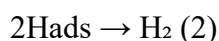
Durante o processo de polarização catódica, ocorre a redução das moléculas de água presentes na solução, resultando na formação de hidrogênio atômico (Hads) na superfície metálica. Esse hidrogênio pode então seguir diferentes trajetórias: recombinar-se na forma molecular e ser liberado para o meio (reações de recombinação) ou difundir-se para o interior da estrutura cristalina do material metálico (reação 4), promovendo a fragilização por meio dos mecanismos anteriormente descritos.

As reações principais envolvidas no processo são (BARD; FAULKNER, 2001):

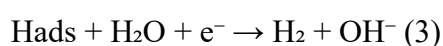
Redução da água:



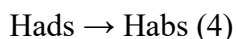
Recombinação química na superfície:



Recombinação eletroquímica:



Absorção no material:



O equilíbrio entre essas trajetórias determina a proporção de hidrogênio que efetivamente é absorvida ou liberada. A reação (2) é de particular interesse neste estudo, pois representa a etapa de recombinação superficial que leva à formação de gás hidrogênio ( $\text{H}_2$ ), o qual pode ser quantificado experimentalmente. Logo, além de um fator de degradação, o processo também viabiliza a produção de um vetor energético limpo e de interesse industrial.

### 3.1.2 Quantificação da Absorção de Hidrogênio

A quantidade de hidrogênio absorvido durante o processo pode ser estimada por meio da Lei de Faraday, utilizando a corrente aplicada, o tempo do ensaio e a área útil do corpo de prova:

**Equação 1:** Concentração de Hidrogênio pela Lei de Faraday

$$Q = \frac{I * t}{F * A}$$

Onde:

Q: concentração de hidrogênio ( $\text{mol}/\text{cm}^2$ )

I: corrente (A)

t: tempo (s)

F: constante de Faraday ( $96.500 \text{ C/mol}$ )

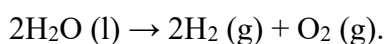
A: área útil do corpo de prova ( $\text{cm}^2$ )

Essa abordagem permite avaliar, de forma indireta, a quantidade de hidrogênio incorporado (BARD; FAULKNER, 2001), e, com isso, estimar a severidade da fragilização esperada para cada liga analisada. Adicionalmente, a mesma equação serve como base para calcular a quantidade de hidrogênio molecular produzido, considerando a carga total transferida e desconsiderando o fracionamento absorvido, quando o objetivo é mensurar a liberação de  $\text{H}_2$ .

## 3.2 Eletrólise da Água

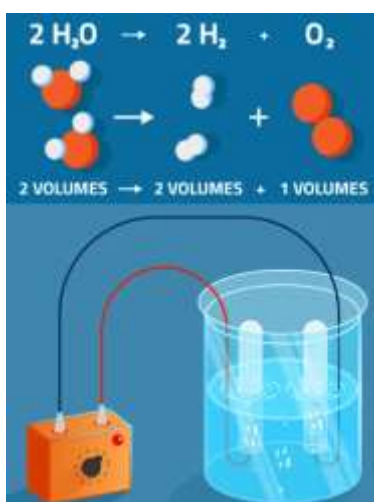
A eletrólise da água é um processo eletroquímico pelo qual a molécula de água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) é dissociada em seus elementos constituintes, oxigênio ( $\text{O}_2$ ) e hidrogênio molecular ( $\text{H}_2$ ), por

meio da aplicação de uma corrente elétrica contínua. Tal processo ocorre em uma célula eletrolítica, composta por dois eletrodos (cátodo e ânodo), um eletrólito e uma fonte de tensão. No ânodo ocorre a oxidação da água, com liberação de oxigênio, enquanto no cátodo ocorre a redução dos íons hidrônio, resultando na liberação de hidrogênio molecular. A reação global que rege o processo é representada por:



Nesse sentido, como representado na Figura 1, o processo ocorre em meio aquoso com separação física dos eletrodos e aplicação de tensão externa para promover as reações de oxidação e redução.

**Figura 1:** Esquema geral do processo de eletrólise da água com liberação de  $\text{H}_2$  e  $\text{O}_2$



*Fonte: FOGAÇA, 2016.*

A eficiência desse processo depende de vários fatores, como a temperatura, a concentração e natureza do eletrólito, o material dos eletrodos e o valor da corrente aplicada. A eletrólise da água desponta como uma alternativa tecnológica limpa e renovável para a produção de hidrogênio, especialmente quando alimentada por fontes de energia sustentáveis, caracterizando o chamado hidrogênio verde (IRENA, 2020).

### 3.2.1 Eletrólise e Cronoamperometria

Do ponto de vista termodinâmico, a tensão mínima necessária para promover a dissociação da água é de aproximadamente 1,23 V, considerada a condição padrão (PARSONS,

1958). Contudo, perdas associadas à resistência da solução, à polarização dos eletrodos e aos sobrepotenciais exigem a aplicação de uma tensão superior para que a eletrólise ocorra de forma efetiva. Esse valor, conhecido como sobretensão total, varia de acordo com as propriedades físico-químicas do sistema. A compreensão dessas características é fundamental para a otimização da eficiência energética do processo e da seleção de materiais adequados para aplicação industrial (BARD; FAULKNER, 2001).

Neste contexto, a técnica de cronoamperometria permite simular, em escala laboratorial, condições práticas de eletrólise. A aplicação de um potencial fixo permite o registro da densidade de corrente em função do tempo, possibilitando a análise do comportamento eletroquímico da superfície dos materiais testados. Além disso, a área sob a curva de corrente permite estimar a quantidade de carga transferida ao longo do ensaio, sendo diretamente proporcional à quantidade de  $H_2$  gerado. Dessa forma, a cronoamperometria se mostra uma ferramenta eficaz para avaliar a atividade catalítica e a eficiência de diferentes materiais metálicos na geração de hidrogênio (HAMANN et al., 2007).

### **3.2.2 Tecnologias Comerciais de Eletrólise**

Diversas tecnologias de eletrólise da água foram desenvolvidas para atender às demandas industriais de geração de hidrogênio em larga escala. As principais abordagens incluem a eletrólise alcalina (AWE), a eletrólise por membrana de troca de prótons (PEM) e a eletrólise de óxidos sólidos (SOEC) (ZENG; ZHANG, 2010).

A eletrólise alcalina (AWE) é a tecnologia mais antiga e consolidada, operando com eletrólitos como KOH ou NaOH, e utilizando eletrodos baratos e duráveis, apresentando boa robustez operativa, embora com menor eficiência e baixa compatibilidade com fontes intermitentes de energia.

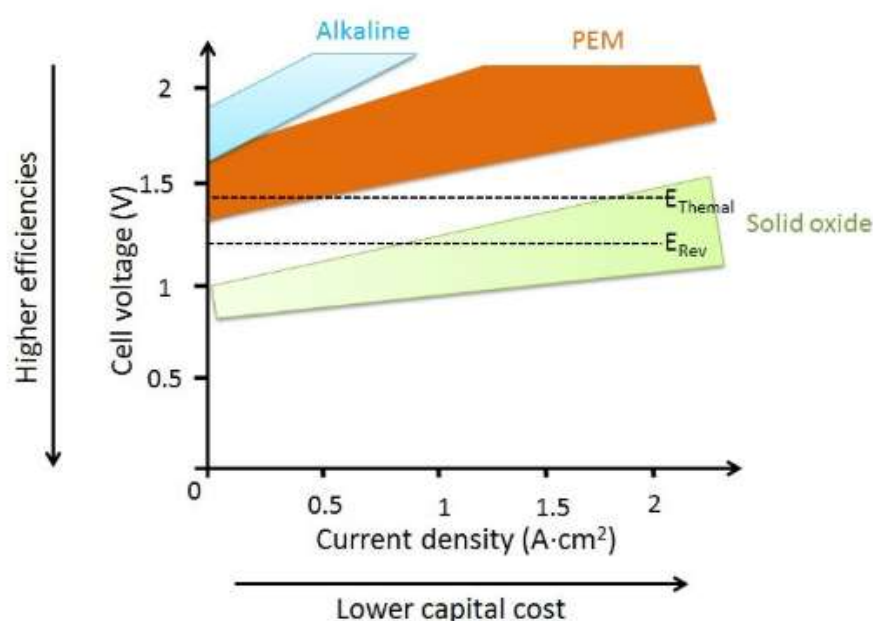
A tecnologia de eletrólise por membrana de troca de prótons (PEM), por sua vez, utiliza membranas poliméricas condutoras de prótons e permite uma operação mais eficiente, em condições dinâmicas e com maior densidade de corrente. Essa característica a torna adequada para integração com sistemas de energia renovável. Contudo, requer o uso de catalisadores nobres, como platina e irídio, o que encarece o processo.

Já a eletrólise por óxidos sólidos (SOEC), embora menos difundida, apresenta elevado potencial de eficiência energética, utilizando temperaturas entre 700 e 1000 °C para reduzir a

energia elétrica necessária. Essa abordagem, contudo, enfrenta desafios quanto à estabilidade e vida útil dos materiais cerâmicos envolvidos (FRANKS, 2021).

Nesse sentido, a Figura 2 apresenta a comparação entre as tecnologias de eletrólise AWE, PEM e SOEC, evidenciando que a AWE possui menor custo e maior maturidade comercial, embora opere com menor densidade de corrente. Nesse contexto, a PEM, por sua vez, oferece alta eficiência e resposta rápida, mas exige catalisadores nobres, elevando o custo e a SOEC destaca-se pela alta eficiência teórica ao operar em temperaturas elevadas, embora ainda enfrente limitações técnicas quanto à durabilidade dos materiais.

**Figura 2:** Comparativo esquemático entre as tecnologias de eletrólise da água



Fonte: PHILLIPS et al, 2019

### 3.2.3 Aplicações Industriais na Transição Energética

A eletrólise da água tem sido incorporada progressivamente em iniciativas globais voltadas à transição energética e à descarbonização de setores estratégicos da indústria. Projetos de hidrogênio verde já se encontram em operação ou em fase de implantação em vários países, incluindo Alemanha, Japão, Austrália e Arábia Saudita. Tais empreendimentos visam a integração de eletrolisadores com fontes renováveis, com capacidades superiores a 100 MW, utilizando predominantemente tecnologias AWE e PEM (IRENA, 2020).

No Brasil, destaca-se o polo de hidrogênio verde instalado no Complexo Industrial e Portuário do Pecém, no estado do Ceará, que abriga projetos piloto com o objetivo de atender tanto ao mercado interno quanto à exportação. A expectativa é que, com a redução dos custos de produção e o aumento da eficiência dos eletrolisadores, a eletrólise da água se consolide como uma rota competitiva frente a processos tradicionais, como o reformador a vapor de metano. A seleção de materiais com alta eficiência eletroquímica, como avaliado por meio de ensaios de cronoamperometria, torna-se um aspecto fundamental para o avanço dessa tecnologia em escala industrial.

Nesse sentido, a Figura 3 apresenta uma representação da implantação da planta Pecém H<sub>2</sub>V, da empresa EDP Brasil, que representa um marco para a geração de energia limpa no país. Instalada no município de São Gonçalo do Amarante (CE), a unidade é a primeira do estado dedicada à produção de hidrogênio verde, utilizando fonte solar de 3 MW e eletrolisador com capacidade de 250 Nm<sup>3</sup>/h. A iniciativa integra o Complexo Industrial e Portuário do Pecém e reforça a consolidação do Ceará como polo estratégico na transição energética nacional

**Figura 3:** Produção do H<sub>2</sub>V no Pecém (representação)



*Fonte: Site institucional do Complexo do Pecém (2023)*

### 3.3 Liga Al-Si-Cu-Mn (360.X)

As ligas de alumínio-silício são amplamente empregadas na indústria automotiva, aeronáutica e de bens de consumo devido à sua leveza, elevada condutividade térmica e elétrica, excelente resistência à corrosão e notável fundibilidade. Essas propriedades tornam as ligas Al-Si especialmente adequadas para processos de fundição sob pressão, com destaque para aquelas da série 3xx, cuja composição química é enriquecida por elementos de liga como cobre e manganês. Dentro desse contexto, a liga AISI 360.X se destaca por apresentar uma

microestrutura eutética refinada, associada a elementos adicionais que ampliam seu desempenho mecânico e eletroquímico em aplicações avançadas.

A adição de silício, geralmente entre 9% e 11% em massa, favorece a formação de uma microestrutura composta por matriz de alumínio (fase  $\alpha$ -Al) e partículas de silício primário e eutético. Essa configuração promove excelente estabilidade dimensional, elevada resistência ao desgaste e comportamento térmico uniforme. O cobre, quando presente entre 0,25% e 0,60%, promove o endurecimento por precipitação de fases como  $Al_2Cu$ , contribuindo para a elevação da resistência mecânica e à fluência em temperaturas elevadas. Já o manganês desempenha um papel importante na refinação dos grãos e na modificação das fases intermetálicas ricas em ferro (como a  $\beta$ -AlFeSi), que normalmente são frágeis e prejudiciais à tenacidade. A presença controlada de Mn permite a formação de fases mais benignas como  $Al_6Mn$ , que reforçam a estabilidade térmica e resistência à corrosão localizada (Sanjari et al., 2022).

Do ponto de vista eletroquímico, essas características microestruturais são altamente relevantes. A matriz contínua de alumínio garante elevada condutividade elétrica (próxima de 37,7 MS/m), o que favorece o transporte eficiente de carga elétrica durante processos como a cronoamperometria. Além disso, a distribuição homogênea das partículas de silício e das fases intermetálicas atua na uniformização da superfície ativa, facilitando a nucleação e o desprendimento de bolhas de hidrogênio, o que otimiza a eficiência da reação de evolução de hidrogênio (HER) em meios salinos. A ausência de zonas de segregação grosseiras também contribui para a manutenção da estabilidade superficial durante exposições eletroquímicas prolongadas, reduzindo a incidência de passivação localizada ou degradação morfológica (Li et al., 2023).

Em comparação com materiais tradicionalmente utilizados em sistemas eletroquímicos, como os aços carbono, inoxidáveis e maraging, a liga AISI 360.X apresenta vantagens significativas. Sua menor densidade contribui para redução de massa em aplicações estruturais, enquanto o custo por unidade de área se mostra inferior devido à ampla disponibilidade comercial do alumínio e seus compostos. Além disso, sua condutividade elétrica é até uma ordem de magnitude superior à de aços inoxidáveis comuns, o que se traduz em menor perda ôhmica e maior eficiência energética nos processos de eletrólise (Hosseini et al., 2020).

Estudos recentes também reforçam a importância da modificação da morfologia do silício eutético para potencializar o desempenho das ligas Al-Si em ambientes eletroativos. A adição de elementos como estrôncio ou sódio tem sido empregada para transformar a morfologia acicular do silício em formas mais refinadas e arredondadas, diminuindo a concentração de tensões internas e aumentando a tenacidade do material. Embora tal técnica

não tenha sido aplicada diretamente neste trabalho, sua eficácia é bem documentada e representa um caminho viável para futuras otimizações da liga AISI 360.X em contextos eletroquímicos (Hosseini et al., 2020).

Assim, a integração entre composição química balanceada, microestrutura refinada e condutividade elétrica elevada posiciona a AISI 360.X como uma liga promissora para aplicações envolvendo eletrólise de solução salina com geração de hidrogênio molecular. Sua performance técnica, associada ao baixo custo e à estabilidade em meios corrosivos, confere-lhe um diferencial competitivo frente a ligas mais caras e complexas. Essa combinação de fatores reforça o papel das ligas Al-Si-Cu-Mn em iniciativas voltadas à transição energética e à sustentabilidade industrial.

### **3.4 Aços Inoxidáveis**

Os aços inoxidáveis, materiais de engenharia de grande importância, distinguem-se por sua notável resistência à corrosão, característica fundamental que os torna indispensáveis em uma ampla gama de aplicações industriais e cotidianas. Essa resistência provém da formação de uma camada passiva de óxido de cromo na superfície do material, resultado da reação entre o cromo presente na liga e o oxigênio atmosférico (ASM International, 1990). Essa camada, com espessura nanométrica, atua como uma barreira eficaz, protegendo o aço da ação de agentes corrosivos.

Além dessa proteção química, os aços inoxidáveis apresentam uma combinação única de propriedades mecânicas e físicas. Sua resistência mecânica, ductilidade e tenacidade os tornam adequados para aplicações que exigem elevada integridade estrutural. A facilidade de conformação e a boa soldabilidade ampliam ainda mais sua versatilidade, permitindo a fabricação de componentes complexos e estruturas robustas. A estética característica, com superfícies lisas e brilhantes, também contribui para sua ampla adoção em aplicações arquitetônicas e de design (DAVIS, 1994).

A classificação dos aços inoxidáveis baseia-se em sua microestrutura e composição química, resultando em cinco famílias principais: austeníticos, ferríticos, martensíticos, duplex e endurecíveis por precipitação.



Os aços austeníticos, a família mais comum, caracterizam-se por sua excelente resistência à corrosão, especialmente em ambientes ácidos ou alcalinos, e elevada ductilidade, decorrente da microestrutura austenítica estável à temperatura ambiente (KRAUSS, 2005).

Os ferríticos, com baixo teor de carbono e alto teor de cromo, são magnéticos e apresentam boa resistência à corrosão em meios moderadamente agressivos.

Os martensíticos, por sua vez, possuem maior teor de carbono, podendo ser endurecidos por tratamento térmico, o que resulta em altos níveis de resistência e dureza.

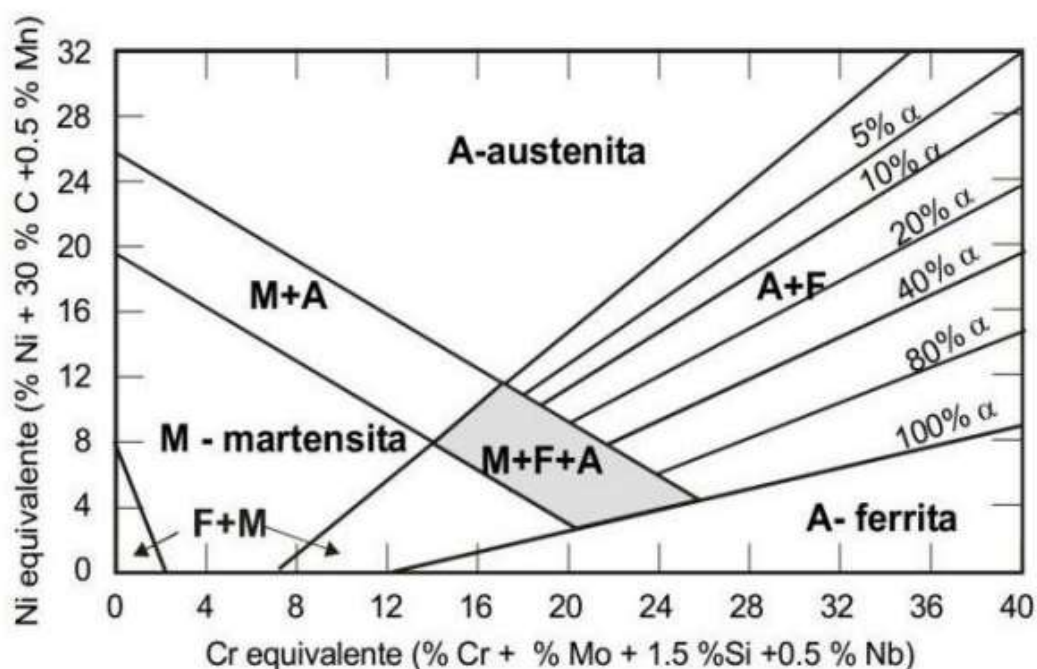
Os duplex combinam características das fases austenítica e ferrítica, proporcionando excelente desempenho em resistência mecânica e resistência à corrosão.

Por fim, os endurecíveis por precipitação alcançam alta resistência por meio de tratamentos térmicos específicos, sendo utilizados em aplicações que demandam elevada resistência mecânica e tenacidade, mesmo em altas temperaturas.

A versatilidade dos aços inoxidáveis se reflete em uma ampla gama de aplicações: equipamentos para indústrias química e petroquímica, sistemas de processamento de alimentos, utensílios de cozinha, tanques de armazenamento higiênicos na indústria alimentícia, instrumentos cirúrgicos, implantes e equipamentos hospitalares esterilizáveis na área médica, revestimentos arquitetônicos, estruturas metálicas e elementos decorativos duráveis na construção civil, além de sistemas de escapamento, componentes estruturais e peças expostas à corrosão na indústria automotiva.

Nesse contexto, a Figura 4 apresenta o diagrama de Schaeffler, utilizado para prever as fases presentes em ligas inoxidáveis com base na composição química. O eixo X representa o Cromo equivalente, enquanto o eixo Y expressa o Níquel equivalente. No diagrama, observa-se que o níquel estabiliza a fase austenítica, enquanto o cromo favorece a formação da fase ferrítica (ZHANG, 2021).

**Figura 4:** Diagrama de Schaeffler



Fonte: ASM, 1993.

### 3.4.1 Aço Ferrítico

Os aços inoxidáveis ferríticos formam uma das principais famílias dos aços inoxidáveis, sendo amplamente utilizados em aplicações industriais, estruturais e domésticas. Essa classe de aços é denominada "ferrítica" devido à predominância da fase ferrita em sua microestrutura à temperatura ambiente, caracterizada por uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC), idêntica à do ferro à temperatura ambiente (DAVIS, 1994).

A composição química desses aços é baseada principalmente em ferro e cromo, com teores de cromo variando entre 11% e 30%, e com baixos teores de carbono, níquel, nitrogênio e outros elementos de liga (COSTA E SILVA, 2021). A presença elevada de cromo é essencial para a formação da camada passiva de óxido de cromo, que confere a resistência à corrosão. O níquel, quando presente em teores superiores a 3,5%, tende a estabilizar a fase austenítica, sendo, portanto, limitado ou ausente nas ligas ferríticas. O diagrama ternário Fe-Cr-C, frequentemente utilizado na metalurgia física, ilustra que os aços ferríticos situam-se à direita da região austenítica, em virtude da influência estabilizante do cromo sobre a ferrita (COSTA E SILVA, 2021).

Em termos de propriedades, os aços ferríticos se destacam por sua elevada condutividade térmica, menor coeficiente de expansão térmica e boa resistência à oxidação em altas temperaturas.

Entre os aços ferríticos utilizados no presente estudo, destacam-se o AISI 410S, UNS S41003 (410D), e o Inox AISI 430. A identificação dessas ligas foi realizada com base em análise de composição química, utilizando espectroscopia de emissão ótica, de forma a confirmar suas classificações dentro da família ferrítica (SILVA, 2025; SANTIAGO, 2023; SALES, 2024).

O AISI 430 é considerado o ferrítico clássico, amplamente empregado na indústria de eletrodomésticos, automotiva e de utensílios domésticos, devido à sua boa resistência à corrosão em ambientes levemente agressivos, boa conformabilidade e excelente desempenho à oxidação (CARVALHO, 2000). O AISI 410S, por sua vez, é uma variante ferrítico-martensítica do 410, com teor reduzido de carbono.

Já o UNS S41003 (410D), conforme descrito por Aperam (2019), é um aço ferrítico de alta eficiência estrutural, com baixo teor de carbono, níquel em torno de 0,5% e cromo entre 10 e 13%.

### **3.4.2 Aço Martensítico**

Os aços inoxidáveis martensíticos constituem uma importante classe de materiais utilizados em aplicações que requerem simultaneamente resistência mecânica elevada, boa resposta ao tratamento térmico e resistência moderada à corrosão. Sua composição química é baseada no sistema Fe-Cr-C, com teores de cromo entre 10,5% e 18% e carbono de até 1,2% em massa, o que confere a essas ligas a capacidade de transformar austenita em martensita em uma ampla faixa de velocidades de resfriamento (ASM, 1993).

Do ponto de vista das propriedades, esses aços são conhecidos por apresentar alta dureza, boa resistência ao desgaste, à fadiga, à tração e à oxidação até cerca de 600 °C, além de custo relativamente reduzido em comparação aos aços inoxidáveis austeníticos (CHIAVERINI, 2005). Embora sua resistência à corrosão seja inferior à dos aços austeníticos, ainda é considerada satisfatória para diversas aplicações industriais.

Esses aços são amplamente empregados em componentes submetidos a solicitações mecânicas severas, como lâminas forjadas, turbinas, compressores, eixos de bombas, válvulas, parafusos estruturais e componentes da indústria aeroespacial (CHIAVERINI, 2005).

Entre os aços martensíticos analisados no presente trabalho, destaca-se o Endur 300 (também conhecido como 410T). Sua identificação e caracterização química também foram confirmadas por meio de análise espectroscópica realizada durante o desenvolvimento deste estudo, a partir de amostras fornecidas para os ensaios eletroquímicos (SANTIAGO, 2023)

O Endur 300 é desenvolvido a partir da liga UNS S41003, porém submetido a um tratamento termomecânico específico. Esse processo envolve aquecimento controlado, seguido de laminação a quente e resfriamento rápido, o que resulta em uma microestrutura martensítica refinada, conferindo ao material alta dureza, excelente conformabilidade a frio e boa tenacidade (APERAM, 2015).

### **3.4.3 Aço Austenítico**

Os aços inoxidáveis austeníticos constituem a maior família entre os aços inoxidáveis, tanto em número de ligas disponíveis quanto em diversidade de aplicações industriais. Essa classe de materiais é caracterizada por apresentar estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC), conferida pela presença significativa de elementos austenitizantes, como níquel, manganês e nitrogênio (DAVIS, 1994). Essa estrutura proporciona excelente ductilidade, conformabilidade, tenacidade e resistência à corrosão, além da ausência de transição dúctil-frágil, o que os torna ideais para aplicações em baixas e altas temperaturas (SILVA, 2010).

Segundo a American Society for Metals (ASM), os aços inoxidáveis austeníticos podem ser divididos em dois grupos principais: (I) ligas cromo-níquel, como o AISI 316, e (II) ligas cromo-manganês-nitrogênio, como o QN1803. A principal função do níquel nas ligas do primeiro grupo é estabilizar a fase austenítica e promover maior resistência à corrosão e à oxidação. Já no segundo grupo, o manganês e o nitrogênio atuam conjuntamente para substituir o níquel, promovendo a estabilidade da austenita com menor custo (CHIAVERINI, 1988).

Entre os aços analisados no presente estudo, classificam-se como inoxidáveis austeníticos o AISI 316 e o QN1803. Suas respectivas composições químicas foram determinadas experimentalmente por meio de análise espectroscópica, confirmando sua classificação microestrutural (SALES, 2024; BARROS, 2024)

O AISI 316 (UNS S31600) é um aço inoxidável austenítico pertencente à série 300, desenvolvido para oferecer maior resistência à corrosão que o AISI 304 em ambientes moderadamente agressivos. Essa melhora se deve à adição de molibdênio (Mo), que aumenta significativamente a resistência à corrosão localizada, como pite e fendas, especialmente em meios com cloretos (SANDMEYER, 2014). Além disso, o AISI 316 possui excelente conformabilidade, boas propriedades mecânicas em temperaturas elevadas e ampla aplicação nos setores naval, químico e petroquímico.

O QN1803 (AISI 304D) é um aço austenítico modificado, no qual parte do níquel é substituído por manganês e nitrogênio, mantendo boas propriedades mecânicas e resistência à corrosão com menor custo. A análise química realizada no presente estudo confirmou sua classificação como uma liga cromo-manganês-nitrogênio, com teores significativos desses elementos. Sua estrutura metalográfica pode apresentar frações residuais de ferrita, dependendo da rota de fabricação, sendo classificado como um aço austenítico modificado ou pseudo-austenítico (JIANG; CHENG; 2020).

A nomenclatura QN1803 possui significado específico: a letra "Q" representa alta resistência, "N" indica a presença de nitrogênio, "18" refere-se ao teor de 18% de cromo e "03" ao teor de 3% de níquel.

Estudos experimentais reforçam o potencial dos aços inoxidáveis austeníticos como candidatos viáveis para a produção de hidrogênio por processos eletroquímicos. Gallina et al. (2014), ao investigarem eletrodos de aço inoxidável 304 e 316 em meio de ácido fórmico  $3 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , demonstraram que o AISI 304 apresentou eficiência relativa cerca de 120% superior à da platina, mantendo desempenho similar na produção de gás hidrogênio. O destaque, contudo, recai sobre o aspecto econômico: a platina, embora notoriamente eficiente, apresenta custo aproximado 20 mil vezes superior ao do aço inoxidável. Tais resultados evidenciam que, sob determinadas condições eletroquímicas, ligas austeníticas como o AISI 304 podem aliar desempenho técnico competitivo com viabilidade econômica expressiva, especialmente em cenários que exigem produção em larga escala e controle de custos.

### **3.4.3.1 Aço Superaustenítico**

Os aços inoxidáveis superausteníticos constituem uma subclasse dos austeníticos convencionais, sendo caracterizados por sua excelente resistência à corrosão localizada, especialmente à corrosão por pite e fresta em ambientes contendo cloretos, bem como por elevada tenacidade, ductilidade, formabilidade e soldabilidade (SINGH, 2020). Sua matriz é completamente austenítica em temperatura ambiente e apresenta elevada estabilidade estrutural mesmo após conformação a frio, sendo pouco suscetíveis à formação de martensita ou à fragilização por hidrogênio.

Ligas como o AL-6XN PLUS® são consideradas superausteníticas por apresentarem resistência superior à corrosão por pite, especialmente em ambientes clorados, conforme critérios internacionais baseados em sua composição química, como os definidos pela ASTM G48 (SINGH, 2020).

Entre os superausteníticos, destaca-se o AL-6XN PLUS®, utilizado no presente trabalho. A identificação e a caracterização química desta liga foram realizadas experimentalmente por meio de análise espectroscópica, permitindo confirmar sua classificação microestrutural como aço superaustenítico (BARROS, 2024). A análise revelou teores elevados de níquel, cromo e molibdênio, além da presença significativa de nitrogênio, elementos conhecidos por reforçar a resistência à corrosão localizada.

Essa liga pertence à especificação UNS N08367 e representa uma versão aprimorada do AL-6XN tradicional, com teores otimizados de cromo, molibdênio e nitrogênio, elevando seu desempenho em ambientes extremamente agressivos, como água do mar, fluídos farmacêuticos e soluções oxidantes com cloretos (ATI MATERIALS, 2023).

Portanto, o uso de aços inoxidáveis superausteníticos como o AL-6XN PLUS® representa uma solução de alto desempenho para aplicações em que a integridade do material em ambientes corrosivos extremos é um requisito crítico.

## **3.5 Aço Carbono**

Os aços carbono constituem uma das classes mais amplamente utilizadas da metalurgia, sendo caracterizados essencialmente pela combinação dos elementos ferro (Fe) e carbono (C), com baixa presença de outros elementos de liga. São comumente classificados pela nomenclatura SAE 10xx, na qual os dois primeiros dígitos indicam a ausência de elementos de

liga adicionais significativos e os dois últimos dígitos indicam o teor de carbono em centésimos de porcentagem (SILVA, 2010).

Entre os aços carbono de baixo teor de carbono, destaca-se o SAE 1008, amplamente utilizado na indústria automotiva e de embalagens metálicas. Conforme especificado pela norma SAE J403, sua composição química típica é apresentada na Tabela 1. No presente estudo, a composição do SAE 1008 foi determinada experimentalmente por meio de análise espectroscópica, a fim de confirmar sua classificação.

**Tabela 1:** Composição Química do Aço SAE 1008 (SAE J403)

**Elemento Faixa ou Máximo (%)**

C	Máx. 0,08
Mn	0,30 – 0,50
P	Máx. 0,04
S	Máx. 0,05
Si	Res. 0,03

*Fonte: SAE Handbook (2004)*

Esse aço apresenta como microestrutura predominante uma matriz de ferrita ( $\alpha$ ), com pequena fração de perlita distribuída de forma lamelar. A ferrita, com estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), confere alta ductilidade ao material, enquanto a perlita proporciona certa resistência mecânica. A baixa concentração de carbono, entretanto, impede a formação de martensita com taxas de resfriamento convencionais, limitando seu endurecimento por têmpera (CALLISTER, 2012).

O baixo teor de carbono e manganês contribui para boa soldabilidade e excelente conformabilidade a frio, sendo ideal para aplicações como chapas para carrocerias, peças estampadas e embalagens metálicas. No entanto, a menor dureza e resistência mecânica limitam seu uso em ambientes com solicitações mais severas.

Além disso, o aço SAE 1020, também presente no escopo deste estudo, teve sua composição química confirmada experimentalmente. Com um teor de carbono de aproximadamente 0,20%, o SAE 1020 oferece maior resistência mecânica em comparação ao

SAE 1008, sem comprometer significativamente a soldabilidade. Sua microestrutura pode conter frações mais pronunciadas de perlita e, dependendo do tratamento térmico, pode apresentar resposta parcial à têmpera.

Por fim, o aço carbono AISI 1030, igualmente analisado, também teve sua composição determinada por espectroscopia. Este material apresenta maior dureza e resistência à tração em comparação aos aços 1008 e 1020, embora com menor ductilidade e soldabilidade. Sua microestrutura contém uma fração mais significativa de perlita, podendo formar martensita em tratamentos térmicos apropriados. É comumente empregado na fabricação de engrenagens, eixos, bielas e outros componentes submetidos a esforços mecânicos moderados (FERREIRA; MOURA, 2016).

A identificação e a caracterização química destas 3 ligas foram realizadas experimentalmente por meio de análise espectroscópica, permitindo confirmar sua classificação microestrutural como aços carbonos (NASCIMENTO, 2025; SILVA, 2025).

### **3.6 Aços Maraging**

Os aços maraging constituem uma classe especial de aços ultra-resistentes, desenvolvidos originalmente na década de 1960 pela International Nickel Company (INCO), com o objetivo de atender aplicações que exigem elevadas propriedades mecânicas, como componentes aeroespaciais, estruturas pressurizadas e ferramentas de alta precisão (PARDAL et al., 2006). O nome "maraging" deriva da combinação de "martensita" com "age hardening", refletindo a microestrutura martensítica formada por resfriamento e o posterior endurecimento por envelhecimento.

Esses aços são essencialmente ligas Fe-Ni de baixo carbono, contendo entre 12% e 25% de níquel, além de elementos como cobalto, molibdênio, titânio e alumínio, que participam do processo de endurecimento por precipitação durante o tratamento térmico de envelhecimento entre 400 e 700 °C. A martensita formada à temperatura ambiente é do tipo cúbica de corpo centrado (CCC), com baixa dureza inicial e excelente usinabilidade, mas se transforma significativamente após o envelhecimento, adquirindo altos limites de escoamento (até 2000 MPa) e elevada tenacidade à fratura (SHA; GUO, 2009).

No presente trabalho, foi utilizado o aço maraging da classe 300, com aproximadamente 18% de níquel, classificado como Maraging 300 (18Ni-9Co-5Mo-0,65Ti-0,1Al). Sua



composição química foi determinada experimentalmente por meio de análise espectroscópica, confirmando a presença dos principais elementos endurecedores característicos da norma AMS 6514, além da ausência significativa de carbono (LINHARES, 2025)

A microestrutura do material é composta por martensita em ripas, altamente descontínua e com elevada densidade de discordâncias, propiciando nucleação eficaz de precipitados como  $\text{Ni}_3\text{Ti}$  e  $\text{Fe}_2\text{Mo}$ , que se formam tanto nos contornos de grão quanto no interior dos grãos (FONSECA, 2021).

As aplicações industriais são amplas e de alto valor agregado, incluindo trens de pouso, pinos estruturais, eixos de transmissão para mísseis, recipientes de combustível para foguetes, ferramentas de usinagem de alta precisão, moldes, molas e componentes mecânicos para ambientes criogênicos (CARVALHO, 2000).

### **3.6.1 Efeitos do Nb nos Aços Maraging**

Dentre os materiais estudados neste trabalho, foi incluído uma liga de Maraging 300 modificada com adição intencional de 0,64% de níbio, desenvolvida e fornecida pela Villares Metals, especializada em produtos e soluções em aços e ligas especiais. O material foi fornecido sob a forma de uma barra laminada a quente com 1 metro de comprimento e seção transversal retangular de 55 mm x 35 mm. Essa liga não segue exatamente a composição convencional do Maraging 300 da norma SAE AMS 6514G, mas foi formulada para avaliar os efeitos do Nb na microestrutura e propriedades mecânicas. A composição química está apresentada na Tabela 2 abaixo:

**Tabela 2:** Composição química do Maraging 300 modificado com Nb e faixa da norma SAE AMS 6514G

Elemento	Composição química (%)	Norma SAE AMS 6514G
C	0,004	Máx. 0,03
Si	0,01	Máx. 0,10
Mn	0,01	Máx. 0,10
P	<0,005	Máx. 0,010
S	0,0022	Máx. 0,010
Co	9,57	8,5 – 9,5
Cr	<0,01	Máx. 0,5
Mo	5,13	4,6 – 5,2
Ni	18,6	18 – 19
Ti	0,39	0,5 – 0,8
Al	0,082	0,05 – 0,15
N	0,0017	-
Nb	0,64	-
Fe	BAL	-

*Fonte: Villares Metals; SAE (expressos em ppm) (2024)*

A identificação e a caracterização química desta liga foi realizada experimentalmente por meio de análise espectroscópica, permitindo confirmar sua classificação microestrutural como aço especial maraging (SILVA, 2025).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Material em estudo e composição química

Para o desenvolvimento desta pesquisa, utilizaram-se amostras de uma liga de alumínio-silício, obtidas por meio de processo de fundição. As amostras foram fornecidas pelo Laboratório de Ensaio em Materiais (LEM), vinculado ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMM) da Universidade Federal do Ceará (UFC). A composição química do material investigado neste estudo encontra-se apresentada na Tabela 3, com os valores obtidos por meio de análise de fluorescência de raios X utilizando o S1 TITAN, representado na figura 5, pertencente ao Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) da UFC.

**Figura 5:** S1 Titan utilizado no experimento



*Fonte: Elaborado pelo autor (2025)*

A base normativa utilizada para fins comparativos foi a norma ASTM B179 – *Standard Specification for Aluminum Alloys in Ingot and Molten Forms for Castings from All Casting Processes* (ASTM INTERNATIONAL, 2014), que estabelece os intervalos aceitáveis para os principais elementos das ligas da série 360.0, incluindo variações como a 360.X. Os limites normativos também foram confrontados com dados técnicos disponíveis em bancos de materiais reconhecidos internacionalmente, como Total Materia, MatWeb e os manuais técnicos da ASM International (TOTAL MATERIA, 2025; ASM INTERNATIONAL, 1990).

**Tabela 3:** Composição química da liga AISI 360.X, porcentagem em peso (%p)

	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Pb	Ni
<b>Padrão</b>	88,6- 92,0	9,50- 10,5	<=1,3	0,25- 0,60	<=0,35	<=0,50	<=0,10	<=0,50
<b>Medido</b>	89,39	9,53	0,37	0,34	0,22	0,10	0,04	0,01

*Fonte: ASTM B179 e Elaborado pelo autor (2025)*

Analisando a Tabela 3, observa-se que os valores de composição química obtidos para a peça analisada (porca) estão integralmente de acordo com os limites estabelecidos pela norma ASTM B179 (ASTM INTERNATIONAL, 2014), que rege as ligas de alumínio fundidas da série 360.0. A composição é dominada por alumínio (89,39%) e silício (9,53%), cujos teores são típicos das ligas Al-Si, amplamente utilizadas em aplicações onde se exige boa fluidez no processo de fundição, resistência à corrosão e estabilidade dimensional.

Os demais elementos presentes na liga, incluindo os de caráter residual, como ferro, zinco, chumbo e níquel, apresentam-se em níveis compatíveis com os valores máximos especificados, não acarretando riscos à integridade estrutural nem às propriedades eletroquímicas do material. A conformidade geral com os parâmetros normativos reforça a adequação da liga para os propósitos do estudo, garantindo previsibilidade no comportamento físico-químico durante os ensaios eletroquímicos de hidrogenação.

Dessa forma, os resultados obtidos por espectroscopia de fluorescência de raios X validam a identificação do material como uma liga Al-Si pertencente à série 360.X, processada por fundição e adequada para investigação da geração de hidrogênio via cronoamperometria.

## 4.2 Metodologia

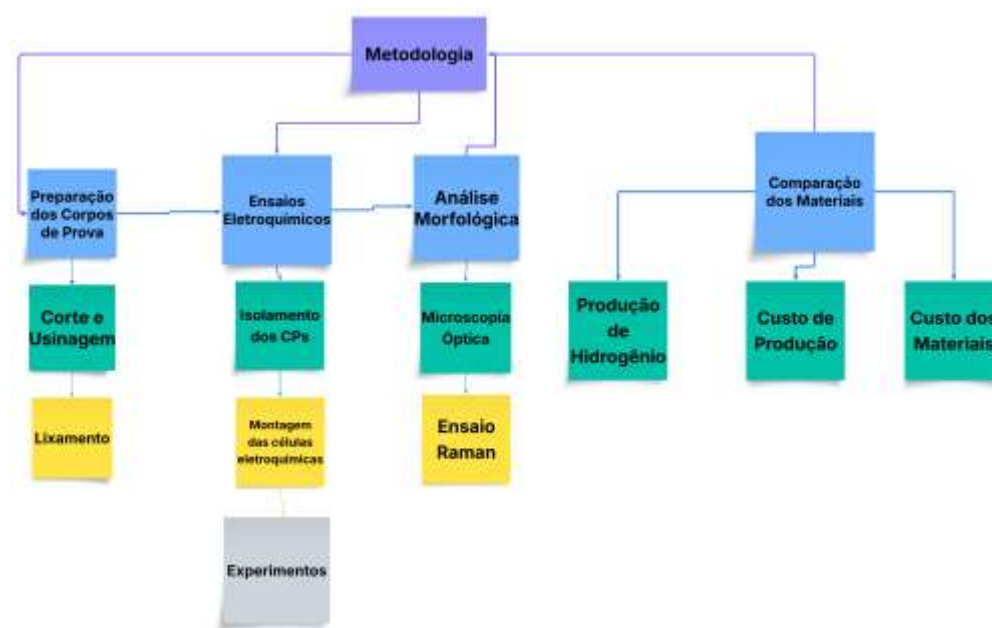
A metodologia empregada para execução deste trabalho foi dividida nas seguintes etapas: preparação dos corpos de prova, realização dos ensaios eletroquímicos e caracterização morfológica.

Os experimentos desse trabalho foram realizados exclusivamente com a liga de alumínio AISI 360.X. Para fins comparativos, foram utilizados dados eletroquímicos obtidos previamente em estudos conduzidos no mesmo laboratório, também por meio da técnica de cronoamperometria. Esses dados foram devidamente normalizados para permitir comparações consistentes com os resultados obtidos nesta pesquisa.

Os materiais considerados na comparação foram: INOX AISI 410S, UNS S41003 (410D), Inox 430, Endur 300, QN1803, AISI 316, AL-6XN Plus, SAE 1008, AISI 1020, AISI 1030, Maraging 300 e Maraging 300 + 0,64%Nb.

A figura 6 demonstra, de forma ilustrativa, a ordem que os procedimentos serão realizados nesse trabalho.

**Figura 6:** Organograma da metodologia do projeto



*Fonte: Elaborado pelo autor (2025)*

#### 4.2.1 Preparação dos corpos de prova

Para realização dos ensaios de hidrogenação eletrolítica, os corpos de prova (CP's) foram fabricados a partir de chapas da liga AISI 360X.

Inicialmente, o material recebido foi levado para o Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM) da Universidade Federal do Ceará (UFC) onde foram realizados os primeiros processos de corte e usinagem para a confecção dos corpos de prova (CPs). Para isso, fez-se o uso de uma serra fita (Figura 7), equipamento que permitiu realizar cortes os quais obtiveram tiras retangulares que deram forma aos CPs.

**Figura 7:** Serra fita



*Fonte: Elaborado pelo autor (2025)*

Para o dimensionamento dos corpos de prova utilizados nos ensaios eletroquímicos, foram adotadas dimensões padronizadas de 55 mm  $\times$  10 mm  $\times$  2 mm, com base na disponibilidade de material e na necessidade de padronização da área superficial entre as amostras. Ressalta-se que não foram realizados ensaios mecânicos neste estudo, sendo as dimensões definidas exclusivamente com o objetivo de garantir uniformidade e reprodutibilidade nos testes eletroquímicos.

Dessa forma, com base nessas dimensões especificadas, o aço estudado foi cortado com a serra fita em 7 corpos de prova. Nesse contexto, 6 desses corpos de prova serão utilizados para realizar os ensaios de cronoamperometria para 1 hora e 3 horas, respectivamente, e o CP7 será utilizado para o ensaio de OCP e polarização catódica.

Em seguida, com as amostras cortadas, foi realizado o lixamento das seis amostras embutidas, que tem como objetivo remover as marcas de corte e nivelar a superfície da amostra. Nesse procedimento foi iniciado com uma lixa de granulometria 80 mesh, a qual foi acoplada à politriz lixadeira metalográfica modelo Teclago PVV (figura 8), sempre com o uso de água, realizando movimentos intercalados de rotação de 90°.

**Figura 8:** Politriz Lixadeira Metalográfica



*Fonte: Elaborado pelo autor (2025)*

Continuando o procedimento, esse processo de lixamento continuou com o escalonamento das lixas, partindo do menor número para o maior, de 80, 120, 220, 320, 400 e 600 mesh utilizando água como agente lubrificante, através da máquina lixadeira da figura 8.

Nesse sentido, as regiões de entalhe do corpo de prova de impacto ficaram expostas para garantir houvesse a maior parte de formação de hidrogênio nestas regiões, enquanto as áreas restantes foram isoladas com fita isolante e veda-roscas.

#### **4.2.2 Ensaios eletroquímicos**

Todos os experimentos eletroquímicos foram realizados no laboratório LPC, utilizando um potenciostato/galvonostato modelo PGSTAT302N (Autolab, Eco Chemie), conectado a um computador com o *software* NOVA versão 2.1.7. Como célula eletroquímica, foi empregado um béquer de vidro com capacidade de 250 mL e um arranjo convencional de três eletrodos, sendo eles: eletrodo de trabalho, eletrodo de referência e contra eletrodo.

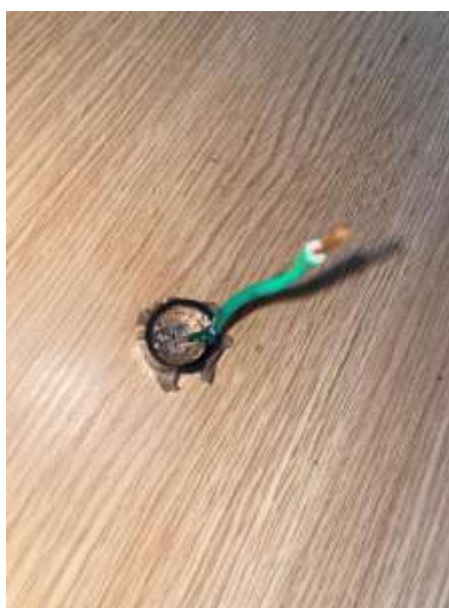
Os ensaios eletroquímicos foram divididos em duas etapas. Na primeira etapa, para os experimentos de monitoramento do potencial de circuito aberto (OCP) com o tempo e de polarização catódica, utilizou-se eletrodos de trabalho da liga AISI 360.X com área geométrica de  $0,211 \text{ cm}^2$ . Na segunda etapa, para os ensaios de hidrogenação eletrolítica, corpos de prova foram empregados como eletrodos de trabalho, com uma área exposta de  $1,00 \text{ cm}^2$ . Em ambas as etapas, um eletrodo de prata/cloreto de prata imerso em uma solução saturada de cloreto de potássio,  $\text{Ag/AgCl/KCl}_{(\text{sat.})}$ , foi empregado como referência. Como contra eletrodo, foi utilizado um eletrodo de platina (Pt) em tela.

Para todos os ensaios eletroquímicos, uma solução aquosa de NaCl 3,5 % (m/v) foi empregada como eletrólito e todos os experimentos foram conduzidos à temperatura ambiente.

#### 4.2.2.1 *Ensaio de OCP e Polarização Catódica*

Para a realização dos ensaios de Potencial de Circuito Aberto (OCP) e Polarização Catódica, uma pequena amostra metálica com dimensões de  $0,38 \times 0,56$  cm foi submetida a um processo de embutimento em resina acrílica. Após a cura do material, procedeu-se ao lixamento da superfície, seguido do isolamento das extremidades metálicas com uma camada de base incolor, assegurando tanto a integridade elétrica quanto a facilidade de manuseio durante os testes. Um entalhe foi cuidadosamente realizado na superfície da amostra com o propósito de acomodar e fixar um fio de cobre, como ilustrado na Figura 9.

**Figura 9:** Peça entalhada e embutida



*Fonte: Elaborado pelo autor (2025)*

Esse fio atuou como condutor elétrico entre a amostra e o equipamento de medição, garantindo um contato eficiente e estável ao longo dos procedimentos eletroquímicos. Todas as etapas foram cuidadosamente planejadas para minimizar interferências externas que pudessem comprometer a precisão dos resultados.

Os ensaios eletroquímicos foram conduzidos nas dependências do Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC), utilizando-se uma solução aquosa de cloreto de sódio (NaCl) a



3,5% (m/v). A preparação dessa solução iniciou-se com a pesagem precisa de 35 g de NaCl, utilizando uma balança analítica de alta precisão (modelo Shimadzu ATY224), conforme mostrado na Figura 10. O sal foi então transferido para um béquer contendo água destilada em quantidade suficiente para promover a dissolução total do soluto, sendo a mistura constantemente agitada com bastão de vidro até a obtenção de uma solução homogênea.

**Figura 10:** Balança analítica Shimadzu.

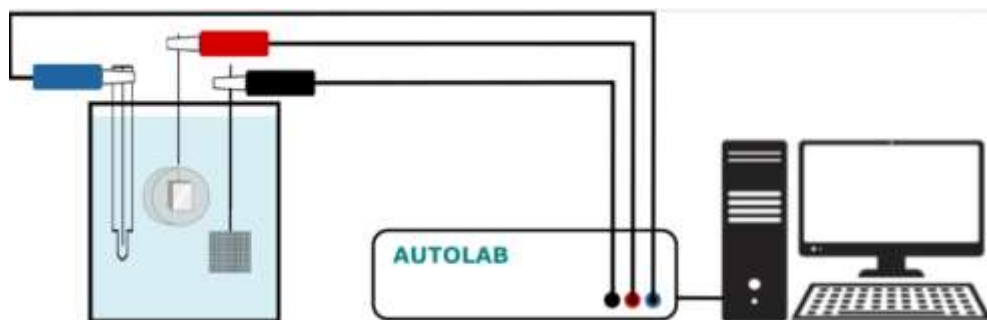


*Fonte: Generalmed, 2024.*

Concluída a dissolução, a solução foi cuidadosamente vertida em um balão volumétrico de 1000 mL, com o auxílio de um funil, a fim de evitar perdas. O volume foi completado com água destilada até a marca indicada no balão. Em seguida, o conteúdo foi homogeneizado por inversão repetida do frasco, assegurando a uniformidade da solução empregada nos ensaios subsequentes.

A célula eletroquímica utilizada nos ensaios de OCP foi composta por um béquer de vidro de 250 mL e um arranjo convencional de três eletrodos. O eletrodo de trabalho consistiu na amostra embutida e entalhada, identificada na Figura 9 e representada em vermelho na Figura 11.

**Figura 11:** Representação esquemática do ensaio eletroquímico.



*Fonte: SILVA (2025)*

O sistema foi complementado com um eletrodo de referência do tipo Ag/AgCl/KCl, destacado em azul, e um contra-eletrodo de platina (Pt) com área superficial de  $1,5 \text{ cm}^2$ , indicado em preto. Os experimentos eletroquímicos foram realizados no laboratório LPC, utilizando um potenciostato/galvonostato modelo PGSTAT302N (Autolab, Eco Chemie), conectado a um computador com o *software* NOVA versão 2.1.7, que permitiu a configuração detalhada e a aquisição de dados experimentais.

Durante o ensaio de OCP, o potencial eletroquímico do sistema foi monitorado ao longo de 3600 segundos, sem a aplicação de corrente externa, permitindo a análise do comportamento de estabilização do material em meio salino. Após esse período, iniciou-se o procedimento de polarização catódica. A varredura foi realizada no intervalo de 0 V a  $-3,0 \text{ V}$  (em relação ao OCP), com uma taxa de varredura de  $1 \text{ mV/s}$ . Esses testes permitiram identificar o comportamento do material frente aos processos catódicos na interface eletrodo/eletrolito, além de determinar a faixa de potenciais na qual ocorre evolução acentuada de hidrogênio, a qual é evidenciada pela formação visível de bolhas gasosas.

#### 4.2.2.2 Cronoamperometria

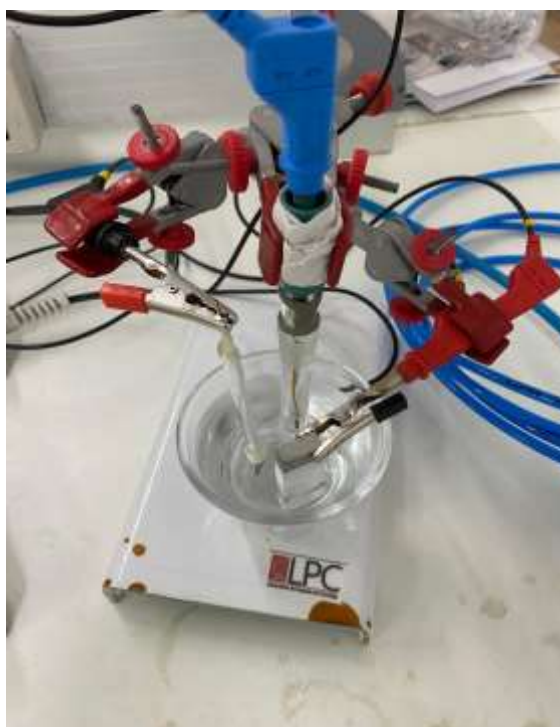
Os ensaios de hidrogenação eletrolítica foram realizados por meio da técnica eletroquímica de cronoamperometria, empregada com o objetivo de formar hidrogênio na superfície dos metais. Os experimentos de cronoamperometria foram divididos em 2 grupos de acordo com a duração do ensaio, sendo eles: 1º grupo (ensaio de 1 hora) e 2º grupo (ensaio de 3 horas). Assim, aplicou-se o potencial catódico de  $-2,50 \text{ V}$  por um tempo de 3600 e 10800 segundos. Em seguida, os resultados cronoamperométricos foram utilizados para o cálculo da

quantidade de hidrogênio produzida na superfície de cada material, empregando a Lei de Faraday, em que  $I$  é a corrente (A),  $t$  é o tempo (s),  $F$  é a constante de Faraday (96,500 C/mol),  $A$  é a área útil do corpo de prova (cm<sup>2</sup>) e  $Q$  é a concentração de hidrogênio formado na superfície do metal (mol/cm<sup>2</sup>), ressaltando que, para utilizar essa equação, foi considerado uma eficiência faradaica de 100%, que toda a corrente foi utilizada para produzir o H<sub>2</sub> que 100% do H<sub>2</sub> gerado foi liberado como gás, já que, para efeitos de comparação, essa estimativa pode ser considerada válida.

$$Q = \frac{I \cdot t}{F \cdot A}$$

Na Figura 12, é apresentada a configuração dos ensaios de hidrogenação eletrolítica.

**Figura 12:** Configuração experimental para o ensaio de cronoamperometria



*Fonte: Elaborado pelo autor (2025)*

#### **4.2.3 Energia Produzida e Custo de Produção**

A análise da eficiência energética nos ensaios de hidrogenação eletrolítica foi realizada por meio da quantificação da energia elétrica consumida durante os experimentos de cronoamperometria. Essa quantificação é fundamental para a avaliação da viabilidade técnica

e econômica do processo, permitindo estimar o custo energético envolvido na produção de hidrogênio molecular em diferentes superfícies metálicas.

Inicialmente, a energia elétrica total consumida (EEE) foi calculada com base nos princípios clássicos da eletrodinâmica. A energia elétrica é definida como o produto da potência instantânea pela duração do processo:

$$E = P * t$$

Considerando que, em sistemas eletroquímicos de corrente contínua e potencial constante, a potência (P) é dada pelo produto entre a tensão (V) e a corrente elétrica (I):

$$P = V * I$$

tem-se, portanto:

$$E = V * I * t$$

Em que:

- E representa a energia consumida (em joules),
- V é o potencial aplicado (em volts),
- I é a corrente média durante o experimento (em ampères),
- t é o tempo total de ensaio (em segundos).

No caso específico das amostras de AISI 360.X, foi adotado um potencial catódico fixo de  $-2,50$  V, conforme determinado a partir dos ensaios de Potencial de Circuito Aberto (OCP) e Polarização Catódica. Para os demais materiais testados, foram aplicados diferentes valores de potencial, ajustados de acordo com as características eletroquímicas individuais de cada liga.

É possível notar, nesse sentido, que o produto dessas variáveis é dado em Joules. Adicionalmente, optou-se por utilizar a densidade de corrente média (J), expressa em miliampères por centímetro quadrado ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ ), como variável central nos cálculos, em substituição à corrente total. Essa densidade representa a corrente elétrica normalizada pela área superficial da amostra. Além disso, a energia foi convertida de joules para quilowatt-hora (kWh), unidade padrão de consumo energético, segundo a relação:

$$1 \text{ kWh} = 3,6 * 10^6 \text{ J}$$

Considerando que a corrente registrada nos ensaios foi expressa em miliampères (mA), a equação foi ajustada conforme esse contexto, resultando, portanto, na seguinte equação:

**Equação 2:** Energia produzida por centímetro quadrado

$$E(\text{kWh/cm}^2) = \frac{V * J * t}{3,6 * 10^9}$$

Com base na energia elétrica específica, o custo de produção foi estimado considerando o valor médio do kWh praticado na Universidade Federal do Ceará (UFC), conforme o *Relatório de Consumo de Água e Energia 2024*, publicado pela Superintendência de Infraestrutura da instituição. Nesse documento, o valor médio do kWh foi de R\$ 0,712238, valor que inclui tarifas, encargos e tributos aplicáveis às unidades de pesquisa.

Dessa forma, o custo de produção de hidrogênio por unidade de área foi obtido a partir do produto entre a densidade de energia elétrica consumida durante o ensaio (em kWh/cm<sup>2</sup>) e a tarifa unitária de energia elétrica praticada pela Universidade Federal do Ceará (em R\$/kWh), conforme apresentado na equação a seguir:

$$\text{Custo (R\$/cm}^2\text{)} = E(\text{kWh/cm}^2\text{)} * 0,712238 \text{ (R\$/kWh)}$$

A densidade de energia foi calculada com base nos dados de corrente elétrica integrados ao longo do tempo de ensaio, considerando a área efetiva de exposição de cada corpo de prova ao eletrólito. Essa abordagem assegura que o custo estimado reflita com precisão o consumo energético necessário para a geração de hidrogênio em uma determinada área metálica submetida à hidrogenação eletrolítica.

Como os valores resultantes para o custo por unidade de área apresentaram magnitude muito reduzida, situando-se na ordem de R\$ × 10<sup>-5</sup> por centímetro quadrado, optou-se por adotar essa notação científica para facilitar a visualização, análise e comparação entre os diferentes materiais avaliados. Essa decisão permite uma leitura mais clara dos resultados e evita a apresentação de números com excesso de casas decimais, o que poderia comprometer a objetividade das interpretações.

Além de garantir a comparabilidade entre os diferentes corpos de prova, a normalização dos custos por unidade de área exposta ao eletrólito segue práticas consolidadas na literatura eletroquímica (BARD; FAULKNER, 2001; LASIA, 2014), conferindo validade técnica e

significado físico aos dados obtidos, fundamentais para a análise crítica dos materiais quanto à eficiência e viabilidade energética do processo de geração de hidrogênio.

Por fim, destaca-se que os experimentos eletroquímicos foram realizados no estado do Ceará, cuja matriz elétrica é amplamente suprida por fontes renováveis. Segundo o Boletim Anual da ABBEólica (2024), o Brasil adicionou 4,8 GW de nova capacidade eólica apenas em 2023, sendo a fonte de maior crescimento no ano. Esse contexto reforça que o consumo energético associado aos ensaios possui origem predominantemente limpa, conferindo ao processo de produção de hidrogênio uma atratividade ambiental ainda maior frente a alternativas baseadas em fontes fósseis.

#### **4.2.4 Caracterização morfológica**

A morfologia foi observada em um microscópio óptico modelo DMI 3000M (Leica), do Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC) da UFC, representado na figura 13.

**Figura 13:** Microscópio óptico para caracterização morfológica



*Fonte: Elaborado pelo autor (2025)*

Como técnica complementar de caracterização, foi realizado um ensaio Raman em uma das amostras submetidas a 3 horas de hidrogenação eletrolítica, com o objetivo de identificar possíveis compostos ou subprodutos formados na superfície após o ensaio eletroquímico. As análises foram conduzidas utilizando o equipamento Witec Alpha 300, representado na figura 14, cuja configuração permite a detecção de sinais associados à presença de produtos de oxidação ou alterações químicas superficiais decorrentes do processo. Os espectros das regiões analisadas foram tratados e representados graficamente com o auxílio do software Origin, o

qual foi utilizado como ferramenta complementar para gerar gráficos de dispersão mais claros e organizados.

**Figura 14:** Witec Alpha 300



*Fonte: WITec Oxford Instruments, 2025*

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

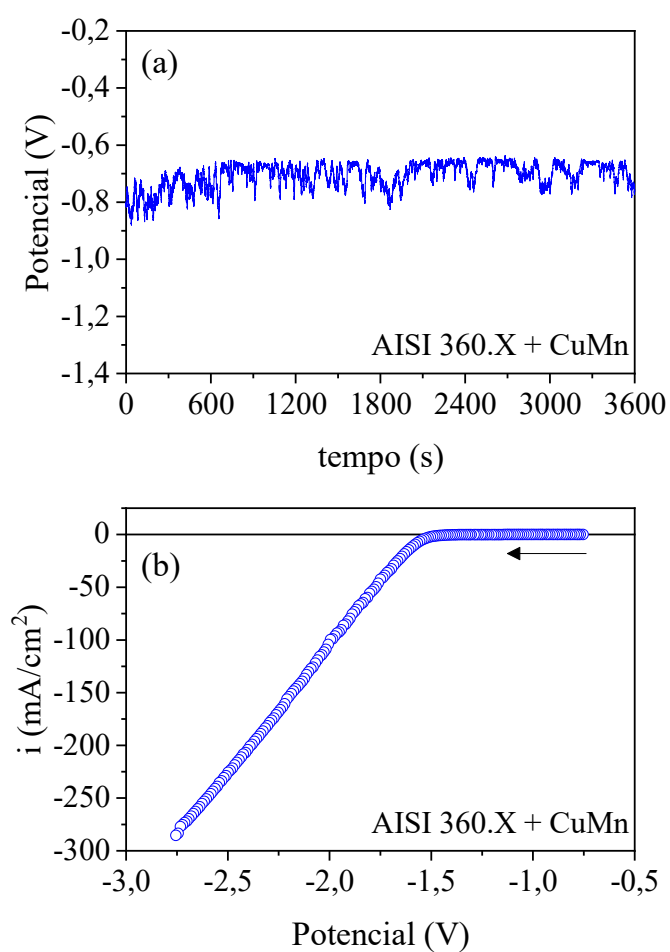
### 5.1 Hidrogenação eletrolítica do AISI 360.X

Iniciando a análise de resultados é possível notar que a Figura 15 apresenta, em (a), o monitoramento do potencial de circuito aberto (OCP) da liga AISI 360.X em solução de NaCl 3,5%. O potencial manteve-se próximo de  $-0,78$  V durante os 3600 segundos, com pequenas oscilações e sem uma estabilização clara, o que sugere atividade eletroquímica contínua da superfície e ausência de formação de filme passivo.

Nesse contexto, na parte (b), observa-se a curva de polarização catódica, com aumento da densidade de corrente à medida que o potencial se torna mais negativo. Embora um ponto de inflexão ocorra por volta de  $-1,50$  V, indicativo da região de difusão controlada da reação de evolução de hidrogênio (HER), foi adotado  $-2,50$  V nos ensaios de cronoamperometria. Essa escolha visou garantir atuação do sistema em uma zona amplamente dominada pela geração de  $H_2$ , reduzindo interferências e favorecendo a comparação com dados de outros materiais sob mesmo sobrepotencial.

**Figura 15:** Monitoramento do potencial de circuito aberto com o tempo (a) e curva de polarização catódica (b) para a liga AISI 360.X, em meio de NaCl 3,5 %

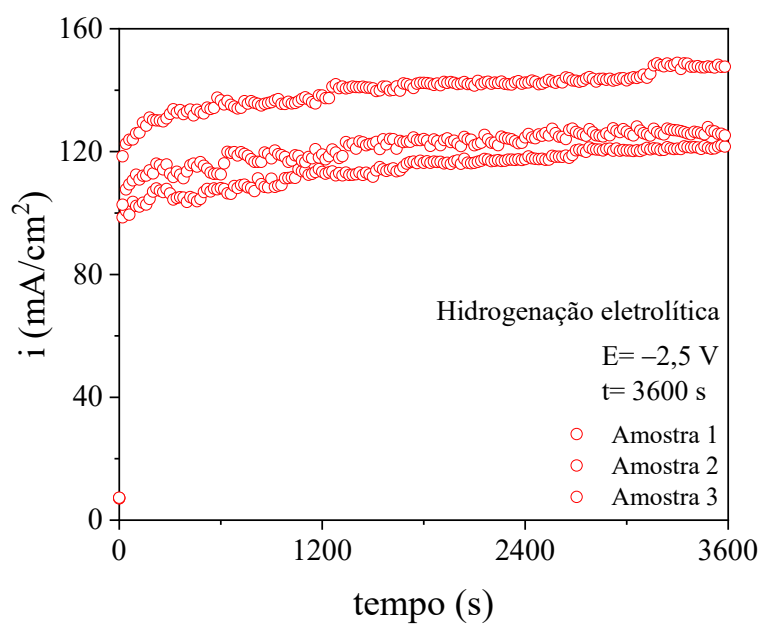




Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

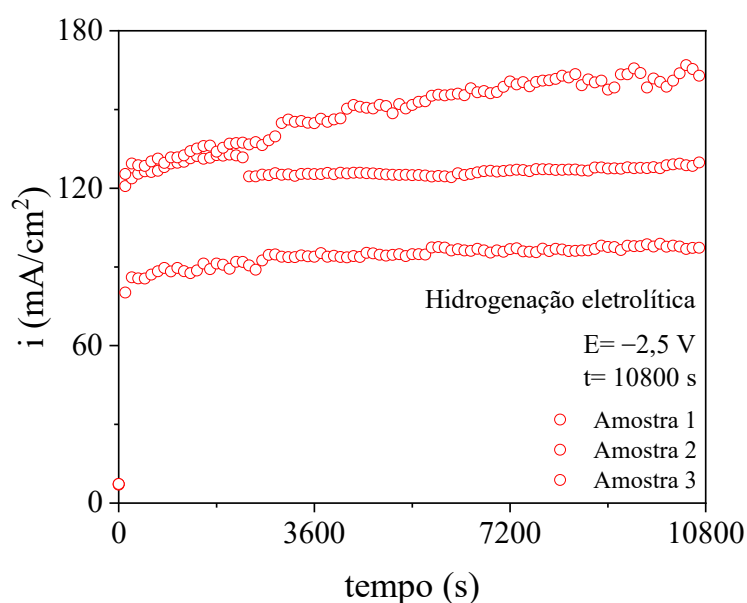
Nesse sentido, a Figura 16 e a Figura 17 apresentam os cronoamperogramas obtidos para os tempos de 1 hora e 3 horas de ensaio, respectivamente, sob aplicação de  $-2,50$  V. Em ambos os casos, observa-se o comportamento transiente da densidade de corrente ao longo do tempo, refletindo a interação eletroquímica entre a superfície metálica e a solução de NaCl 3,5% sob condições controladas.

**Figura 16:** Cronoamperogramas da liga AISI 360.X, em meio de NaCl 3,5 %, obtidos em  $E = -2,50$  V por 3600 s



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

**Figura 17:** Cronoamperograma da liga AISI 360.X, em meio de NaCl 3,5 %, obtidos em  $E = -2,50 \text{ V}$  por 10800 s



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A partir dos dados de corrente obtidos nos cronoamperogramas, foi calculada a quantidade de hidrogênio produzida na superfície metálica da liga AISI 360.X, utilizando-se a equação derivada da primeira Lei de Faraday, já descrita na seção anterior. A Tabela 4 resume os valores médios de densidade de corrente e a respectiva concentração de hidrogênio gerado (em  $\text{mol}/\text{cm}^2$ ), permitindo a comparação entre os dois tempos de ensaio.

**Tabela 4:** Comparativo dos valores médios para quantidade de hidrogênio produzido na superfície da liga AISI 360.X para os tempos de 1 e 3 horas de hidrogenação eletrolítica

Tempo de ensaio	Densidade de corrente média (mA/cm <sup>2</sup> )	Quantidade média de hidrogênio (mol/cm <sup>2</sup> )
1 hora	116,02	$4,33 \times 10^{-3}$
3 horas	115,07	$1,29 \times 10^{-2}$

*Fonte: Elaborado pelo autor.*

Durante os ensaios de cronoamperometria realizados em solução aquosa de NaCl 3,5% (m/v), observou-se a formação de um subproduto com odor característico de “água sanitária”, o que sugere a presença de hipoclorito, conforme apresentado na figura 18. Esse fenômeno pode ser atribuído à oxidação de íons cloreto ( $\text{Cl}^-$ ), que mesmo sob polarização catódica, podem sofrer reações localizadas em regiões da superfície do eletrodo com comportamento anódico. A reação de oxidação gera gás cloro ( $\text{Cl}_2$ ), o qual, em contato com a água, forma ácido hipocloroso ( $\text{HClO}$ ) e, subsequentemente, o íon hipoclorito ( $\text{ClO}^-$ ), responsável pelas propriedades oxidantes e pelo odor típico do hipoclorito de sódio. Esse mecanismo é bem documentado em estudos sobre a eletrocloração, processo utilizado para a produção de hipoclorito a partir da eletrólise de soluções salinas (AFIFY et al., 2023).

**Figura 18:** Subproduto do processo de cronoamperometria



*Fonte: Elaborado pelo autor (2025)*

Apesar da evidência visual e olfativa sugerir a presença de compostos clorados, recomenda-se, em estudos futuros, a realização de análises químicas específicas do subproduto gerado, com o objetivo de confirmar sua composição e natureza. Tal investigação poderá auxiliar na compreensão mais aprofundada das reações secundárias envolvidas durante o processo eletroquímico.

## **5.2 Quantidade de Hidrogênio Produzido na Superfície dos Materiais**

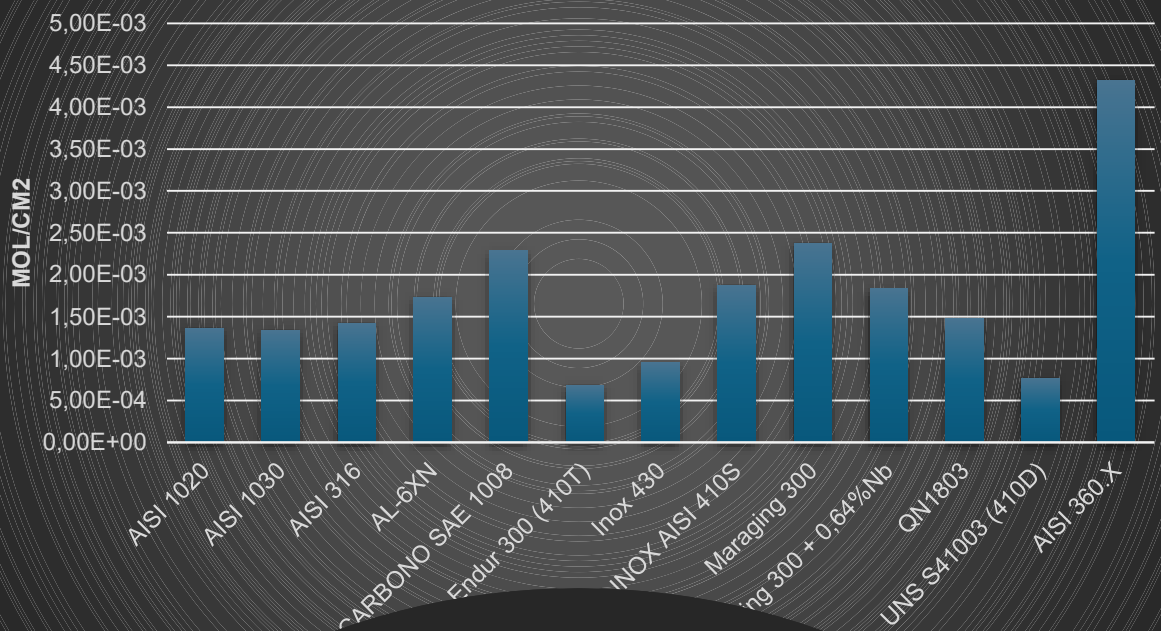
Os resultados obtidos por cronoamperometria permitiram avaliar a capacidade de produção de hidrogênio molecular dos diferentes materiais metálicos analisados. A comparação entre os materiais considerou dois tempos distintos de ensaio (1 hora e 3 horas), com o objetivo de observar a influência da duração da polarização catódica no desempenho eletroquímico de cada amostra.

Durante os ensaios, os valores de potencial catódico aplicados variaram entre os materiais, de modo a respeitar as características eletroquímicas individuais de cada amostra.

A quantidade de hidrogênio gerado por cada material foi obtida com base na carga elétrica acumulada ao longo do tempo, conforme metodologia previamente descrita. Os valores resultantes foram organizados de forma comparativa e estão representados nos gráficos a seguir, permitindo uma visualização clara das diferenças de comportamento entre os materiais ensaiados.

### **Gráfico 1: Quantidade de hidrogênio produzida por material (1 hora)**

**Quantidade de H<sub>2</sub> Produzida em 1 Hora**



Gráfico

**Quantidade de H<sub>2</sub> Produzida em 3 Horas**

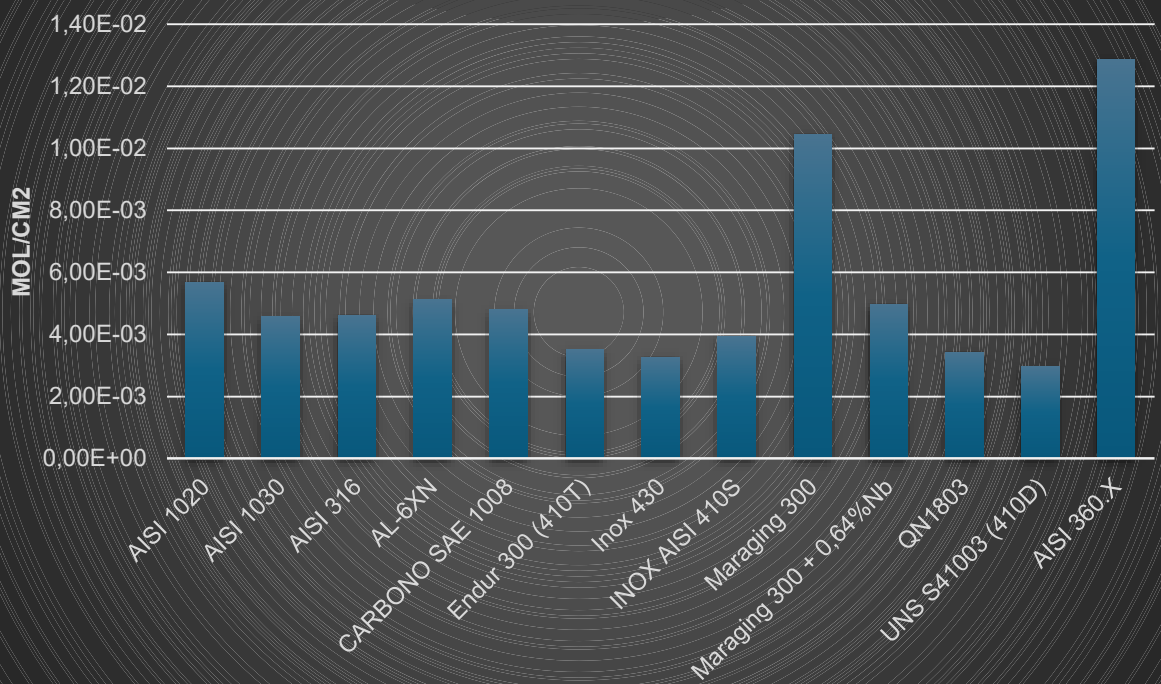
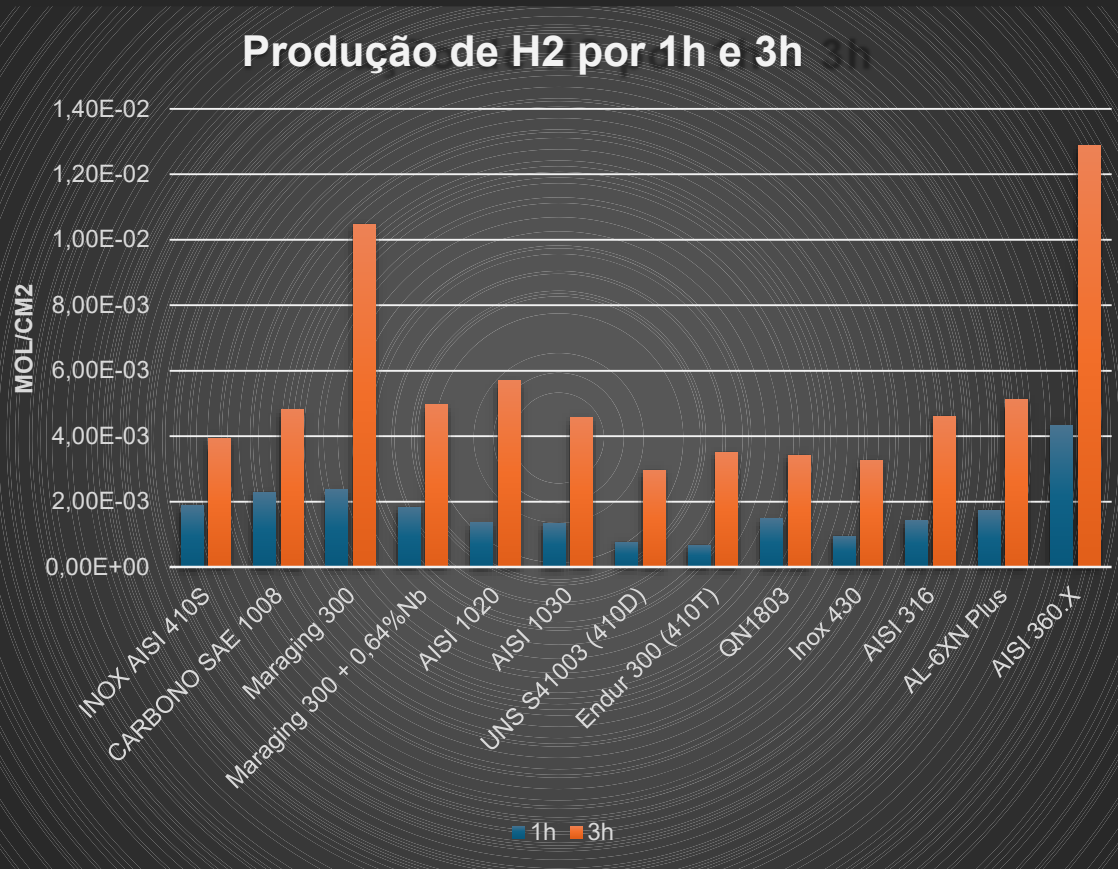


Gráfico 2



A análise dos dados apresentados no Gráfico 2 evidencia que a condutividade elétrica das ligas metálicas exerce influência direta sobre o rendimento observado. Essa propriedade, relacionada à facilidade com que os elétrons se movimentam através do material, favorece a transferência de carga durante o processo de cronoamperometria e, consequentemente, impacta a taxa de evolução de hidrogênio (HER).

A Tabela 5 apresenta os valores típicos de condutividade elétrica, em MS/m, dos principais elementos metálicos presentes nas ligas analisadas, servindo como base técnica para interpretar os resultados do gráfico de produção de H<sub>2</sub>.

**Tabela 5:** Condutividade elétrica de elementos metálicos relevantes (MS/m)

Elemento	Condutividade Elétrica (MS/m)
Cobre	59,60
Alumínio	37,70
Molibdênio	19,70
Cobalto	16,60
Níquel	14,30
Ferro	10,00
Cromo	7,90
Titânio	2,40
Silício	1,56

*Fonte: CALLISTER; RETHWISCH (2020).*

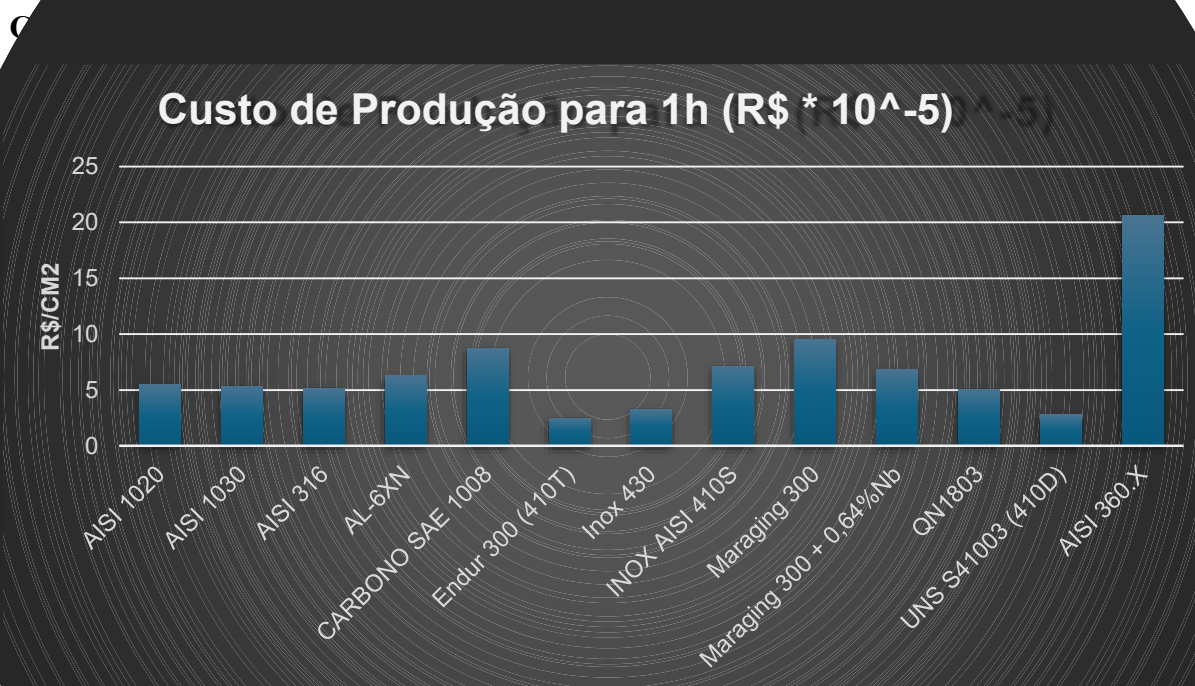
Conforme evidenciado na Tabela 5, os elementos presentes nas ligas metálicas testadas apresentam variações significativas de condutividade elétrica, o que influencia diretamente o desempenho observado nos ensaios eletroquímicos. Nesse contexto, materiais contendo elementos com elevada condutividade, como cobre e alumínio, destacaram-se com os melhores resultados de produção de hidrogênio. Esse comportamento é claramente observado na liga AISI 360.X, cuja composição rica em alumínio e traços de cobre a posicionou como líder de desempenho nos ensaios de 1h e 3h. A presença desses elementos favorece o transporte eficiente de elétrons na interface eletrodo/eletrólito, elevando a densidade de corrente sob aplicação de sobrepotencial e, por consequência, intensificando a reação de evolução de hidrogênio (HER).

Por outro lado, ligas compostas por elementos de baixa condutividade, como silício, titânio e cromo, apresentaram respostas eletroquímicas inferiores, mesmo sob as mesmas condições experimentais. Embora esses elementos sejam importantes para conferir resistência à corrosão e estabilidade mecânica, sua atuação limitada na condução eletrônica acaba por reduzir a eficiência da superfície metálica frente à geração de hidrogênio.

Assim, os dados demonstram que a composição química, especialmente no que diz respeito à condutividade elétrica dos elementos constituintes, é um dos principais fatores responsáveis pelas variações na eficiência eletroquímica dos materiais avaliados.

### 5.3 Custo de Produção e Normalização dos Dados

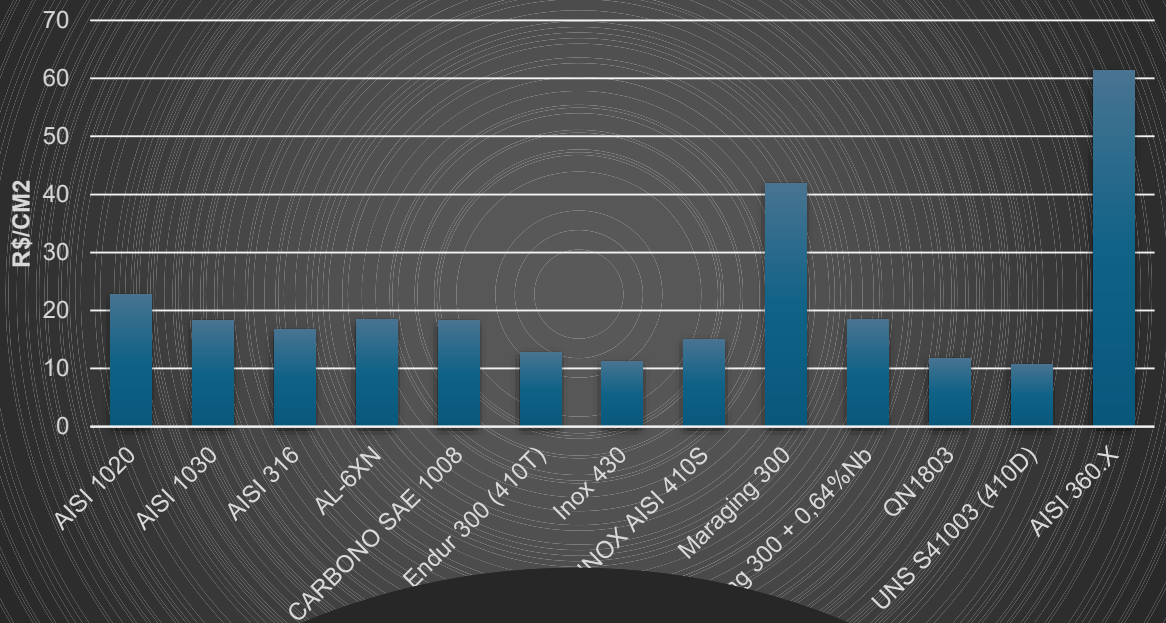
A análise do desempenho eletroquímico dos materiais foi complementada por uma avaliação do custo específico de produção de energia elétrica, expresso em  $\text{R\$} \times 10^{-5}$  por centímetro quadrado ( $\text{R\$/cm}^2$ ). Esse valor foi calculado com base no consumo energético durante os ensaios de cronoampereometria, considerando a tensão aplicada, a área efetiva dos corpos de prova (CPs) e o tempo de teste. Os custos para dois intervalos distintos de tempo foram calculados e os resultados são apresentados a seguir:



**Gráfico 5.3** Custo de Produção para 3 horas ( $\text{R\$} \times 10^{-5}/\text{cm}^2$ )

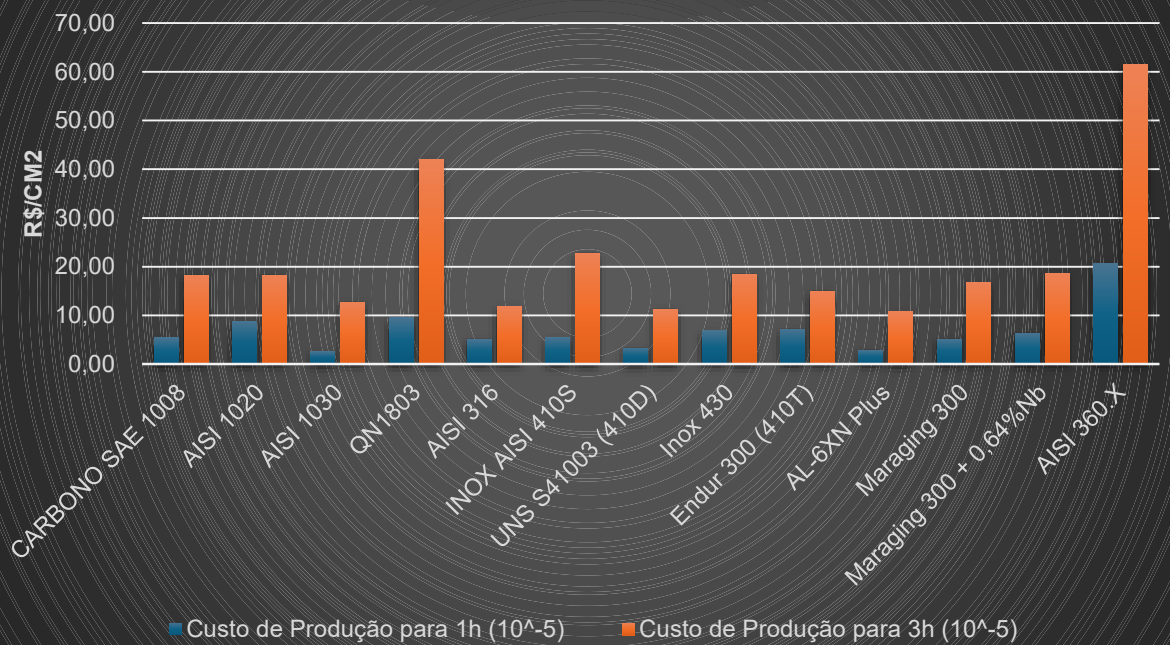


**Custo de Produção para 3h (R\$ \* 10<sup>-5</sup>)**



Gráfico

**Custo de Produção para 1h e 3h**



Durante a análise dos dados, observou-se que a resistência elétrica intrínseca de cada material exerceu uma influência significativa nos resultados de consumo energético. Materiais com maior resistência elétrica apresentaram maiores quedas de potencial durante os ensaios, o que resultou em um consumo energético mais elevado para manter a mesma densidade de corrente. Este fenômeno é particularmente relevante em experimentos de cronoamperometria, onde o controle de corrente constante amplifica os efeitos das perdas ôhmicas.

Para corrigir este efeito e possibilitar uma comparação justa entre os diferentes materiais, foi aplicada uma metodologia de normalização dos custos de produção com base na resistência elétrica de cada amostra. O fator de normalização foi calculado tomando-se como referência a resistência elétrica média do material AISI 360.X, utilizado como corpo de prova principal nos experimentos deste estudo.

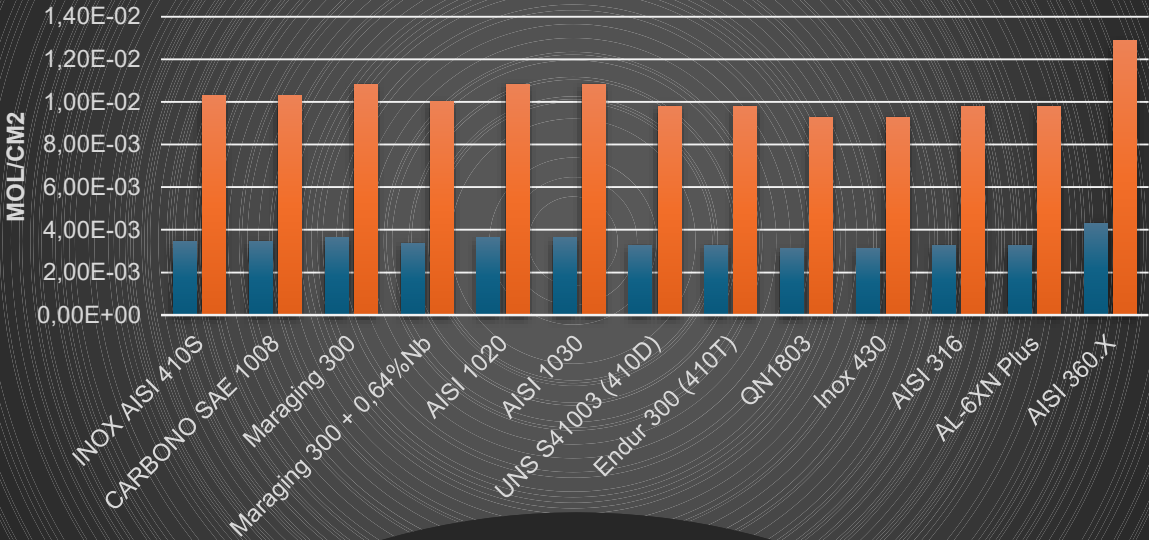
A escolha do AISI 360.X como material de referência justifica-se pelo fato de apresentar a menor resistência elétrica entre todos os materiais testados, caracterizando-se, portanto, como o material de menor perda ôhmica durante os ensaios. Esta abordagem assegura que os demais materiais tenham seus custos energéticos ajustados para um patamar equivalente ao de um material com resistência mais favorável ao processo de eletrólise, permitindo uma análise centrada exclusivamente na eficiência eletroquímica de produção de hidrogênio.

Os fatores de normalização aplicados foram calculados individualmente para cada material e para cada tempo de ensaio (1 hora e 3 horas), com base na razão entre a resistência elétrica média da amostra analisada e a resistência média da liga AISI 360.X. Esses fatores foram utilizados para corrigir os valores de consumo energético específico, permitindo uma comparação mais justa entre os materiais.

Dessa forma, os dados previamente apresentados no Gráfico 3 serviram como base para compor o Gráfico 7, que apresenta a produção de hidrogênio após a normalização.

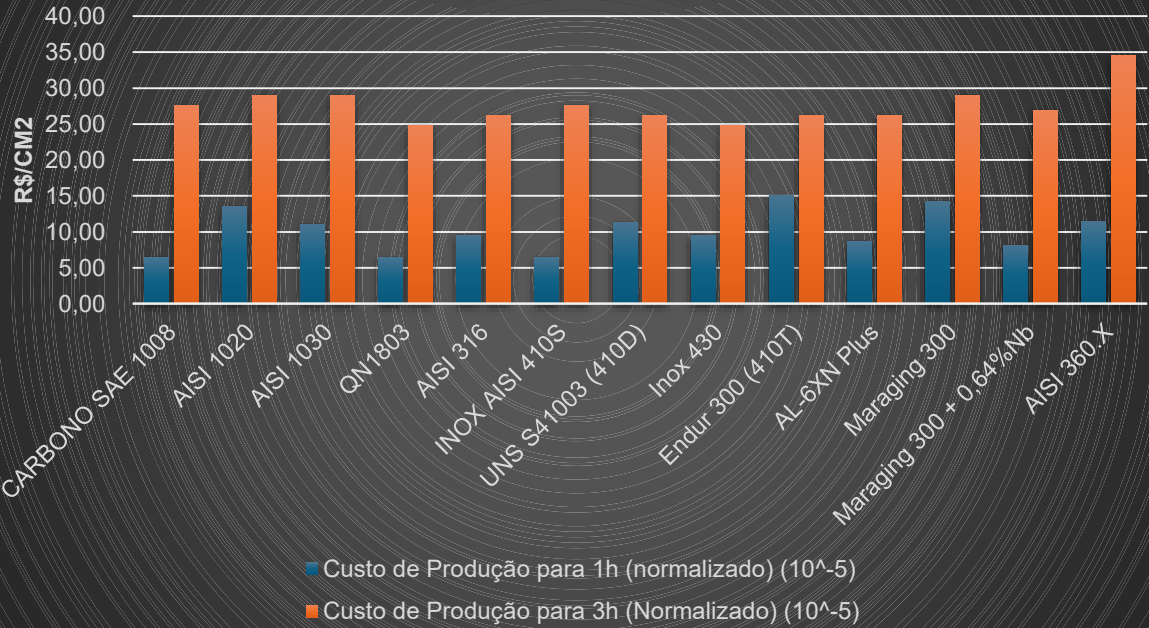
Nesse mesmo contexto, os dados previamente apresentados no Gráfico 6 serviram como base para compor o Gráfico 8, que apresenta o consumo energético após a normalização, evidenciando os efeitos das diferenças resistivas entre os materiais testados, ambos evidenciando os efeitos das diferenças resistivas entre os materiais testados.

Produção de H2 para 1h e 3h (normalizado)



3h

Custo de Produção com Normalização



A comparação entre a produção de hidrogênio antes e depois da normalização evidencia a importância da aplicação desta metodologia para eliminar os efeitos das diferenças de potencial impostas pelas distintas resistências elétricas dos materiais testados. A adoção do AISI 360.X como padrão de referência permitiu uma correção consistente e tecnicamente fundamentada, fortalecendo a confiabilidade dos resultados e possibilitando uma avaliação mais precisa da eficiência energética de cada material na produção de hidrogênio molecular por processos eletroquímicos.

A análise dos gráficos normalizados de produção de hidrogênio e custo evidencia que, ao corrigir os efeitos da resistividade elétrica, as diferenças entre os materiais se tornaram mais sutis do que aquelas observadas nos dados brutos. A liga AISI 360.X manteve a liderança na produção específica de hidrogênio para ambos os tempos de ensaio (1h e 3h), mas seu custo de produção por  $\text{cm}^2$  também se manteve como o mais elevado. Entretanto, outros materiais como os aços maraging, inoxidáveis e carbono apresentaram desempenhos energeticamente competitivos, com custos e produções ajustados em níveis mais próximos. Essa convergência nos resultados indica que a eficiência eletroquímica dos materiais testados é relativamente equilibrada quando se elimina o efeito das perdas ôhmicas, ressaltando que o fator decisivo passa a depender de variáveis adicionais, como durabilidade, aplicação pretendida e custo total de implantação.

#### **5.4 Preço dos Materiais e sua Influência na Análise**

A avaliação econômica dos materiais utilizados na hidrogenação eletrolítica constitui uma etapa fundamental para qualquer estudo com viés tecnológico e potencial de aplicação industrial. Ainda que as análises morfológicas, eletroquímicas e energéticas forneçam dados relevantes sobre o desempenho dos substratos testados, é imprescindível considerar o custo por unidade de área dos materiais metálicos envolvidos, de forma a viabilizar uma análise custo-benefício realista.

Os valores foram obtidos com base em fontes confiáveis do mercado nacional e internacional, levando em conta as formas comerciais mais próximas das amostras utilizadas (geralmente chapas com 1 mm de espessura). Quando não foi possível obter um valor de mercado diretamente, como no caso de ligas experimentais ou especiais (como o AISI 360.X, Maraging 300 + Nb, QN1803 e Endur), adotaram-se estimativas técnicas fundamentadas em composições químicas, densidades e cotação de ligas base similares.

A Tabela 6 apresenta a ordenação dos materiais utilizados neste estudo em função do seu preço por centímetro quadrado, em ordem crescente. Esse tipo de organização permite visualizar com clareza quais materiais representam alternativas mais acessíveis economicamente e quais demandariam maior investimento para aplicações em escala.

**Tabela 6:** Preço por cm<sup>2</sup> dos materiais testados e suas respectivas fontes

Material	Preço (R\$/cm <sup>2</sup> )	Fonte
<b>AISI 360.X</b>	0,0035	<a href="#">Shanghai Metals Market – A360 Alloy</a>
<b>AISI 1020</b>	0,0045	<a href="#">PKM Aços – Tabela comercial</a>
<b>AISI 1030</b>	0,0048	<a href="#">Alibaba – Faixa internacional</a>
<b>SAE 1008</b>	0,0054	<a href="#">Gerdau – Preço médio aço carbono laminado</a>
<b>INOX 430</b>	0,0063	<a href="#">Acesita/Mercado Livre – Chapa Inox 430</a>
<b>UNS S41003 (410D)</b>	0,0072	<a href="#">Aperam - Faixa Internacional</a>
<b>AISI 410S</b>	0,0081	<a href="#">Elinox – Cotação técnica</a>
<b>AISI 316</b>	0,0109	<a href="#">100% Metais – Chapa Inox 316</a>
<b>QN1803</b>	0,0114	Estimativa com base em consulta técnica e literatura (sem fonte pública disponível)
<b>Endur</b>	0,0116	Estimativa técnica com base em ligas duplex de alta performance
<b>AL-6XN</b>	0,013	<a href="#">IMARC Group – AL-6XN price 2024</a>
<b>Maraging 300</b>	0,0196	<a href="#">Wietech3D – Maraging 18Ni300</a>
<b>Maraging 300 + Nb</b>	0,0221	Estimativa com base em acréscimo de Nb ao custo da Maraging 300

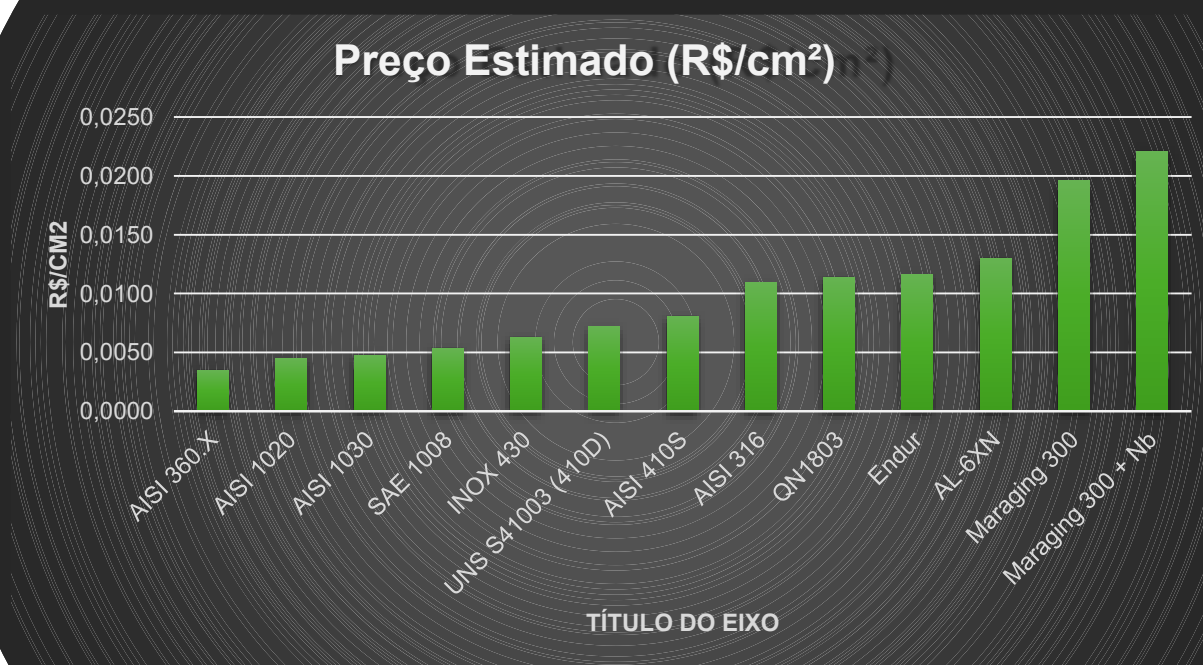
*Fonte: Elaborado pelo autor (2025)*

Com base nesses valores, observou-se que o material AISI 360.X, uma liga à base de alumínio e silício, apresentou o menor custo unitário, superando inclusive os aços carbono convencionais, como o AISI 1020 e o SAE 1008. Este resultado reforça o potencial dessa liga para aplicações sustentáveis com menor custo por unidade de área, especialmente quando associado ao bom desempenho em termos de produção de hidrogênio observado nos ensaios eletroquímicos.

Por outro lado, materiais como o Maraging 300 e sua versão modificada com nióbio (Maraging 300 + Nb) exibiram os custos mais elevados por centímetro quadrado, refletindo sua complexidade metalúrgica, alta resistência mecânica e aplicação restrita a nichos como a indústria aeroespacial. Da mesma forma, o AL-6XN, uma superliga resistente à corrosão, também apresentou valor elevado, embora ainda inferior aos aços maraging.

Para complementar a análise, foram apresentados os dados da tabela, facilitando a comparação direta dos custos por centímetro quadrado.

Gráfico



A integração dos dados de custo com os resultados de desempenho eletroquímico permite uma compreensão mais abrangente do desempenho eletroquímico em contextos reais de aplicação.

Essa abordagem fornece subsídios relevantes para a seleção racional de materiais, tanto em pesquisas futuras quanto em possíveis aplicações industriais da tecnologia investigada.

### 5.5 Análise Morfológica

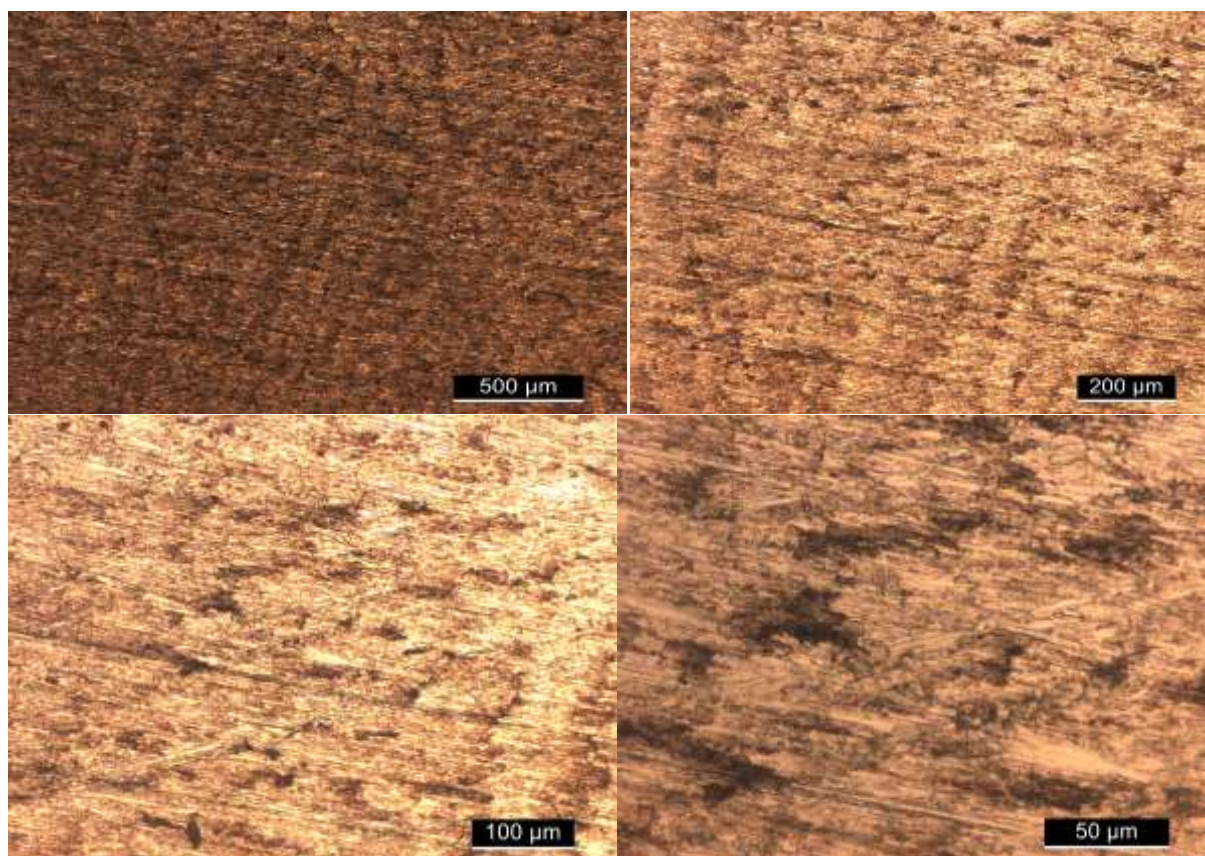
Com o objetivo de investigar os efeitos morfológicos associados à produção de hidrogênio molecular em diferentes tempos de exposição eletroquímica, foi realizada a caracterização superficial de seis corpos de prova, identificados de A1 a A6. Os ensaios foram conduzidos por meio da técnica de cronoamperometria, com aplicação de potencial constante, em dois tempos distintos: 1 hora e 3 horas. As amostras A1, A2 e A3 foram submetidas aos ensaios de 1 hora, enquanto A4, A5 e A6 foram expostas por 3 horas. A avaliação morfológica foi conduzida por microscopia óptica, nas ampliações de 5x, 10x, 20x e 50x, antes e depois da hidrogenação eletrolítica, com o intuito de identificar alterações visuais induzidas pela geração de hidrogênio na superfície metálica.

Para fins de objetividade na apresentação dos resultados, foram selecionadas as amostras A1 e A5 como representativas dos grupos de 1h e 3h, respectivamente. A escolha foi pautada na observação de que ambas apresentaram morfologia superficial compatível com os demais corpos de prova do grupo, sem indícios de comportamento atípico, como ausência de marcas de ataque ou regiões extensas de degradação localizada.

As micrografias obtidas antes da aplicação do potencial eletroquímico, ilustradas nas Figuras 19 e 20, indicam que as amostras apresentavam superfície polida com acabamento uniforme, sem sinais de trincas, delaminações ou porosidade visível. A qualidade do preparo metalográfico permitiu observar discretas variações ópticas e inclusões dispersas ao longo da superfície. Em ampliações maiores (20x e 50x), foi possível identificar partículas alongadas de coloração escura, atribuídas a inclusões não metálicas, possivelmente sulfetos de manganês (MnS), típicos de aços com enxofre adicionado para melhoria da usinabilidade, como o AISI 360.X. Embora a ausência de ataque químico impeça a visualização da microestrutura interna, as características morfológicas observadas são suficientes para assegurar que ambas as amostras se encontravam em condições superficiais similares antes da cronoamperometria, reforçando a validade da comparação entre os tempos de hidrogenação.

**Figura 19:** Micrografias ópticas da amostra A1 (1h) antes da cronoamperometria: (a) 5x; (b) 10x; (c) 20x; (d) 50x.

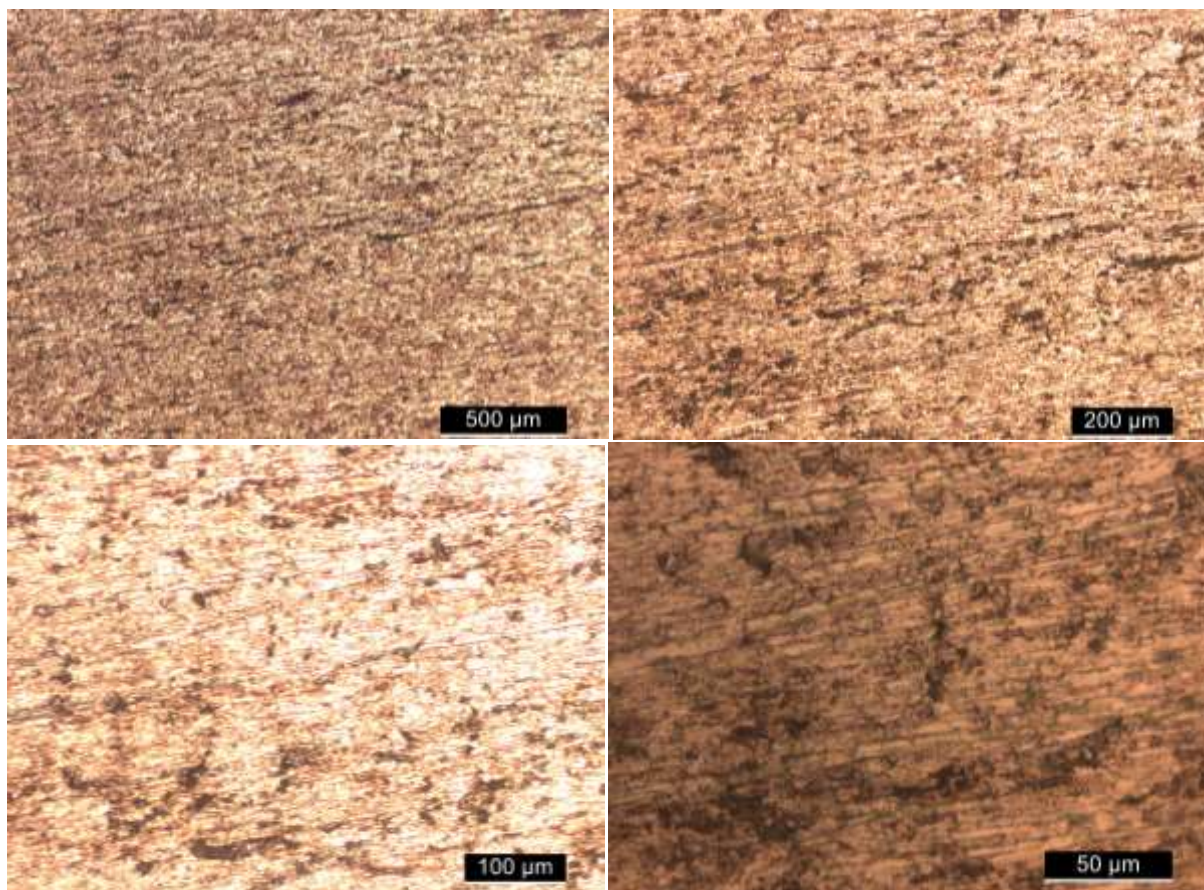




*Fonte: Elaborado pelo autor (2025)*

**Figura 20:** Micrografias ópticas da amostra A5 (3h) antes da cronoamperometria: (a) 5x; (b) 10x; (c) 20x; (d) 50x.

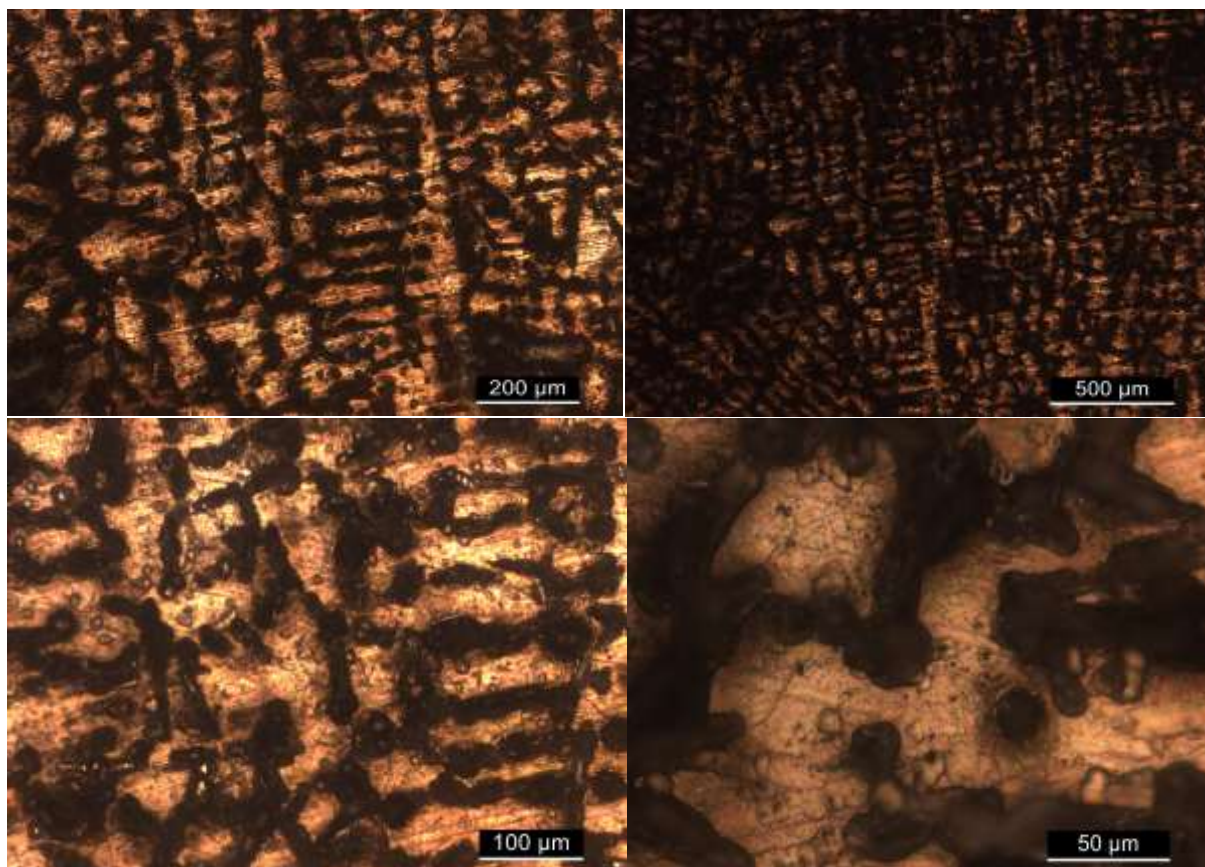




*Fonte: Elaborado pelo autor (2025)*

Após os ensaios de cronoamperometria, as micrografias ópticas da Figura 21 revelam alterações morfológicas discretas na amostra A1, submetida à exposição por 1 hora. Nas ampliações de 5x e 10x, a superfície ainda preserva certa uniformidade óptica, com leve escurecimento em algumas regiões. A partir de 20x, tornam-se mais evidentes pontos com perda de brilho, surgimento de textura superficial irregular e início de rugosidade, especialmente em áreas próximas a inclusões ou descontinuidades pré-existentes. Tais modificações sugerem a atuação localizada da reação de evolução de hidrogênio (HER), com adsorção e desprendimento de bolhas, capazes de induzir micro ataques pontuais na superfície metálica.

**Figura 21:** Micrografias ópticas da amostra A1 (1h) após a cronoamperometria: (a) 5x; (b) 10x; (c) 20x; (d) 50x.

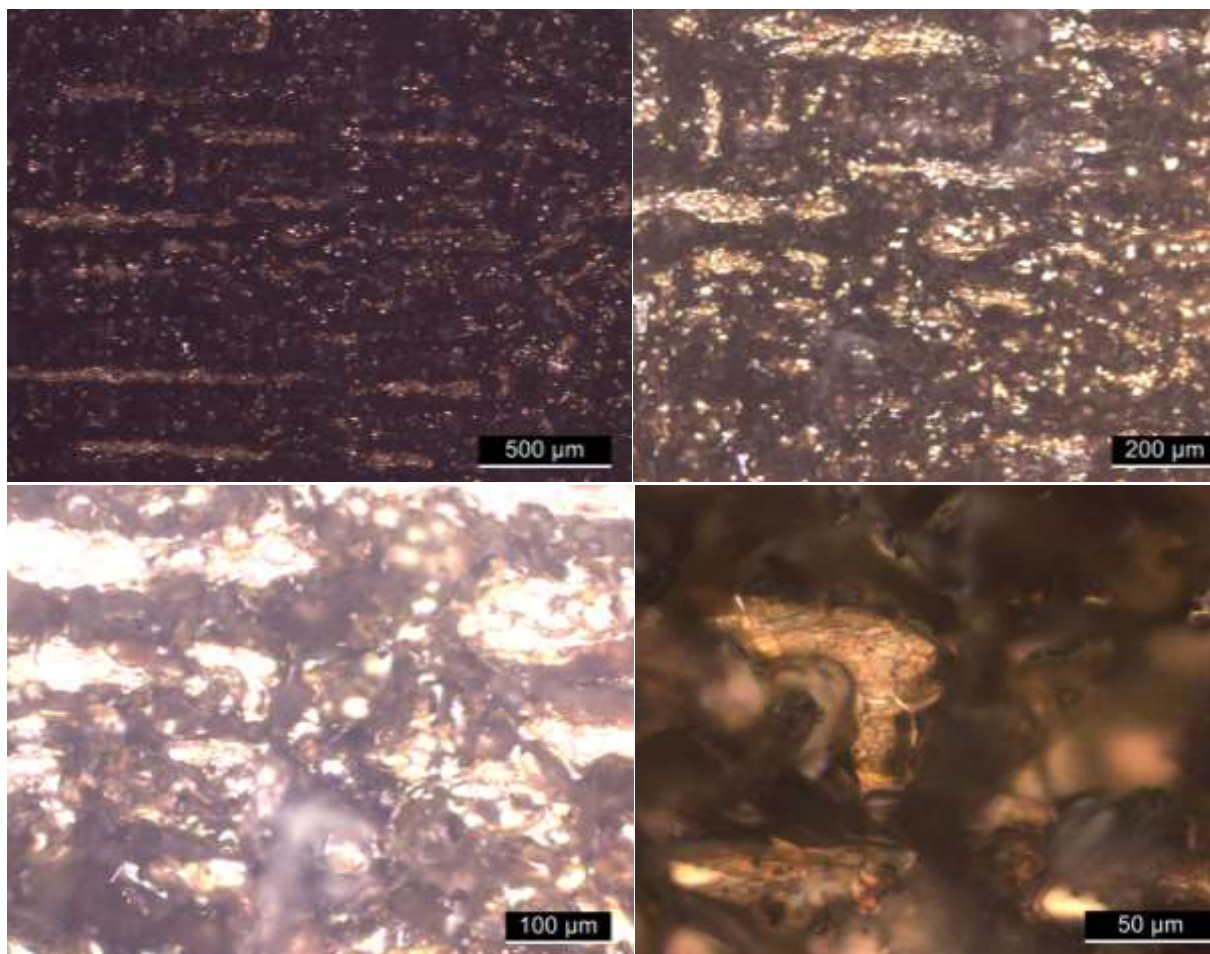


*Fonte: Elaborado pelo autor (2025)*

Já na amostra A5, submetida à cronoamperometria por 3 horas, os efeitos morfológicos são visivelmente mais intensos, como evidenciado nas imagens da Figura 22. Já nas menores ampliações (5x e 10x), observa-se uma maior irregularidade no brilho superficial, indicando perda de planicidade ótica em larga escala. Em 20x e 50x, surgem zonas com escurecimento acentuado, rugosidade pronunciada e áreas com possível formação de microcavidades e desgaste localizado. Essas alterações estão associadas à maior densidade de carga acumulada ao longo do ensaio, que favorece o acúmulo de hidrogênio na superfície, promovendo modificações estruturais mais severas. A assimetria na distribuição dos danos pode refletir variações locais na topografia, composição ou presença de inclusões, fatores que afetam a cinética da HER e a interação do hidrogênio com o material base.

**Figura 22:** Micrografias ópticas da amostra A5 (3h) após a cronoamperometria: (a) 5x; (b) 10x; (c) 20x; (d) 50x.



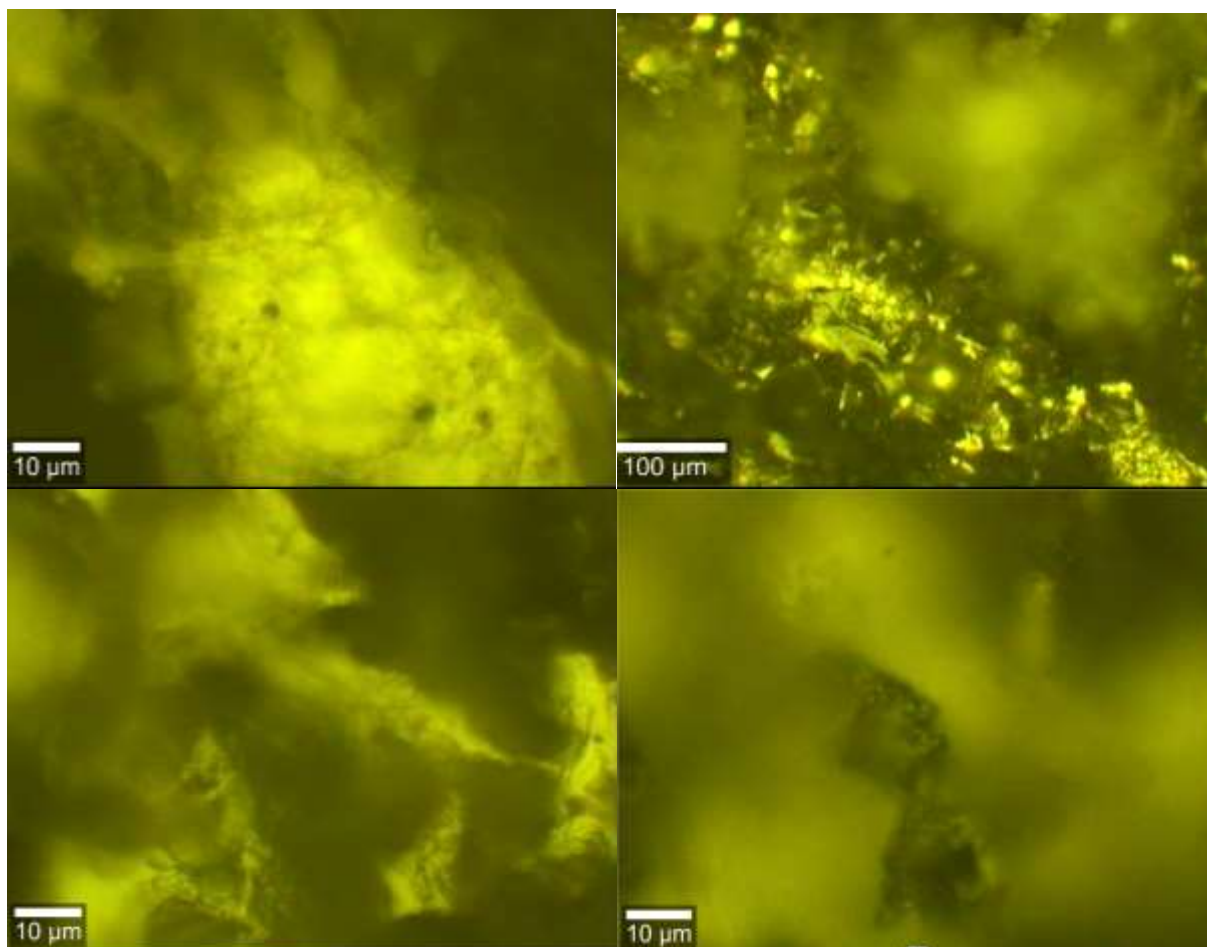


*Fonte: Elaborado pelo autor (2025)*

A comparação entre A1 e A5 evidencia de forma clara o impacto do tempo de exposição sobre a morfologia superficial dos corpos de prova. Enquanto A1 mantém integridade visual com alterações iniciais e localizadas, A5 apresenta sinais mais robustos de degradação, coerentes com a ação cumulativa da hidrogenação eletrolítica. Essa análise morfológica qualitativa complementa os dados eletroquímicos obtidos, reforçando a compreensão dos mecanismos iniciais de interação entre o hidrogênio molecular e ligas metálicas em ambientes eletroativos agressivos.

Complementando a análise morfológica por microscopia óptica, foi realizada espectroscopia Raman na amostra A5, submetida à cronoamperometria por 3 horas. O objetivo foi verificar a ocorrência de alterações químicas ou estruturais superficiais associadas ao processo eletroquímico, a partir de quatro regiões de análise designadas como R1, R2, R3 e R4. A Figura 23 apresenta as imagens das regiões analisadas. Embora os dados espectrais da região R2 não estivessem disponíveis para tratamento gráfico, sua imagem foi mantida para fins de documentação da área analisada.

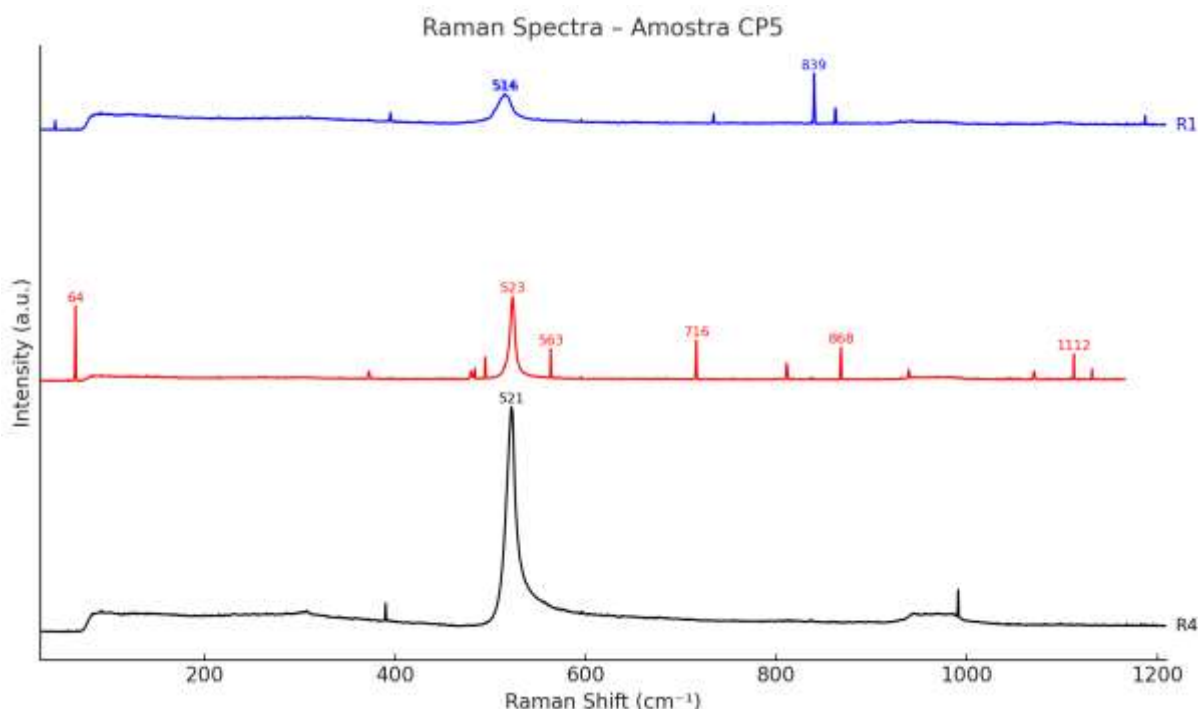
**Figura 23:** Análise Raman da amostra A5 (3h) após a cronoamperometria: (a) R1; (b) R2; (c) R3; (d) R4.



*Fonte: Elaborado pelo autor (2025)*

A seguir, os respectivos espectros obtidos para as regiões R1, R3 e R4 são apresentados no gráfico 10 abaixo, permitindo a análise comparativa dos padrões de resposta espectral em diferentes áreas da superfície da amostra.

**Gráfico 10:** Espectro Raman de A5 nas regiões R1, R3 e R4



*Fonte: Elaborado pelo autor (2025)*

A análise espectral da liga AISI 360.X, composta majoritariamente por alumínio e silício, revelou sinais relevantes que indicam a possível formação de óxidos desses elementos na superfície após a hidrogenação eletrolítica. Em R1, o espectro apresenta comportamento uniforme e de baixa intensidade, compatível com uma superfície pouco alterada quimicamente. Em R3, observa-se um leve aumento de intensidade entre 400 e 800  $\text{cm}^{-1}$ , faixa típica das vibrações de ligação Al–O e Si–O. Esses picos sugerem a presença de óxidos de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e óxidos de silício ( $\text{SiO}_2$ ), os quais são coerentes com a composição da liga. Em R4, há elevações pontuais entre 970 e 1000  $\text{cm}^{-1}$ , atribuídas a estiramentos assimétricos do grupo Si–O, indicativos de sílica em diferentes estados estruturais. A formação desses compostos pode estar associada à própria reação de evolução de hidrogênio (HER), que, ao promover intenso fluxo de elétrons e liberação de gás, favorece a oxidação superficial de metais reativos como o alumínio e o silício. A ausência de picos agudos bem definidos reforça a hipótese de que esses óxidos estejam presentes em formas amorfas ou mal cristalizadas, comportamento comum em superfícies metálicas submetidas a processos eletroquímicos agressivos.

A ausência de picos de referência bem definidos limita a identificação inequívoca de fases, mas o padrão de resposta entre as regiões evidencia a ocorrência de modificações químicas seletivas em certos pontos da superfície. Assim, mesmo com espectros de baixa

intensidade, a técnica Raman contribuiu para indicar variações locais de composição ou estrutura, reforçando a evidência de que o processo de hidrogenação eletrolítica não apenas altera a morfologia, como também promove mudanças químicas detectáveis em nível micrométrico. Essa análise amplia a compreensão dos efeitos da HER sobre a superfície metálica, em complemento às observações visuais e aos dados eletroquímicos.

Com base nas alterações morfológicas observadas, é possível estabelecer inferências sobre o papel da microestrutura no desempenho eletroquímico dos materiais testados. A distribuição de fases, o tipo de matriz metálica e a presença de elementos de liga afetam diretamente a resposta à hidrogenação eletrolítica. No caso da liga AISI 360.X, a homogeneidade superficial, a ausência de zonas de segregação e a presença de silício refinado são compatíveis com uma microestrutura eutética bem distribuída, favorecendo a evolução uniforme de hidrogênio durante os ensaios.

Em contrapartida, os aços com microestruturas mais heterogêneas, como aqueles ricos em carbonetos ou com fases martensíticas endurecidas, apresentaram desempenho inferior em termos de produção de  $H_2$  e maior variação de desgaste superficial. Esses dados indicam que microestruturas mais contínuas, condutivas e menos suscetíveis a segregações são mais adequadas para aplicações eletroquímicas voltadas à geração de hidrogênio molecular. Assim, a análise morfológica não apenas confirma os efeitos da hidrogenação ao longo do tempo, como também permite reforçar a importância da microestrutura como variável crítica na eficiência do processo.

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou de forma abrangente a geração de hidrogênio molecular por hidrogenação eletrolítica em diferentes materiais metálicos, utilizando a técnica de cronoamperometria em solução de NaCl 3,5% (m/v), por 1h e 3h, com foco nos aspectos de eficiência energética, produção de H<sub>2</sub> e viabilidade econômica. A seguir, concluiu-se que:

- ✓ O tempo de hidrogenação teve impacto direto na produção de hidrogênio. Nos ensaios realizados com a liga AISI 360.X, a extensão do tempo de 1 para 3 horas resultou em um aumento significativo da concentração de hidrogênio por unidade de área, em média três vezes maior. Esse aumento está relacionado à maior densidade de carga transferida ao longo do tempo, favorecendo a reação de evolução de hidrogênio (HER).
- ✓ A liga AISI 360.X apresentou o maior consumo energético específico (kWh/cm<sup>2</sup>), refletindo sua alta densidade de corrente. Em contrapartida, materiais como os aços inoxidáveis e carbono apresentaram consumo mais moderado, ainda que com menor produção de hidrogênio. Esses resultados reforçam que a eficiência energética está diretamente ligada à capacidade do material de converter corrente em produção útil de H<sub>2</sub>, com perdas ôhmicas sendo relevantes em ligas de maior resistividade.
- ✓ A normalização dos dados com base na resistência elétrica da AISI 360.X permitiu uma comparação mais justa entre os materiais, eliminando distorções causadas por diferenças de condutividade. Mesmo após essa correção, a AISI 360.X manteve-se como uma das ligas de maior produção específica de hidrogênio, embora com custo energético ainda elevado. A normalização também mostrou que outros materiais, como os aços carbono e inoxidáveis, reduziram bastante sua disparidade de desempenho, revelando que parte de sua ineficiência inicial era atribuída a perdas por resistividade e variações no potencial aplicado durante os ensaios, demonstrando a importância de considerar dados normalizados para uma avaliação técnica mais precisa da eficiência eletroquímica.
- ✓ O custo por unidade de área foi calculado a partir da energia consumida e do valor do kWh praticado. A liga AISI 360.X, apesar de apresentar o maior consumo energético, teve o menor custo por cm<sup>2</sup> de hidrogênio produzido, devido à sua alta eficiência na

conversão de carga elétrica em gás, sendo uma excelente opção para aplicações econômicas em diversos contextos. Os aços carbonos AISI 1020 e AISI 1030 também obtiveram destaque por aliar custo reduzido a um desempenho eletroquímico estável, sendo uma opção viável para aplicações econômicas. Por outro lado, o Maraging 300 com adição de nióbio, embora tecnicamente eficiente, apresentou custo unitário elevado, limitando sua aplicabilidade em processos em escala industrial.

- ✓ A análise evidenciou que a composição química e a microestrutura são fatores decisivos para o desempenho eletroquímico dos materiais. A AISI 360.X, composta por matriz de alumínio-silício com boa distribuição eutética e silício refinado, demonstrou elevada reatividade e boa uniformidade de resposta. Materiais com estruturas mais heterogêneas ou endurecidas, como os aços martensíticos ou com alto teor de carbonetos, mostraram menor eficiência e maior desgaste superficial. Assim, ligas com boa condutividade, baixa segregação e fases contínuas demonstraram ser mais adequadas para processos de produção de hidrogênio por hidrogenação eletrolítica.



### Sugestões para trabalhos futuros

- Investigar o efeito da temperatura e de maiores tempos no processo de hidrogenação eletrolítica e como isso afetará as propriedades mecânicas da liga em estudo;
- Aplicar técnicas avançadas de caracterização de superfície, como microscopia eletrônica de varredura (MEV) para examinar a morfologia e composição química pós-hidrogenação em maior detalhe.
- ✓ Verificar, com base nos dados obtidos, a viabilidade técnica de aproveitamento do hidrogênio gerado como subproduto de processos de fragilização por hidrogênio.
- Estudar a influência de diferentes eletrólitos, incluindo  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{KCl}$  e água do mar, na eficiência da produção de hidrogênio, na formação de subprodutos e na estabilidade dos materiais metálicos, comparando com os resultados obtidos com solução de  $\text{NaCl}$ .
- Realizar uma análise química do subproduto visível gerado durante a cronoamperometria, de modo a identificar sua composição e possíveis implicações para o processo. Essa análise permitiria confirmar com precisão a natureza do resíduo e pode revelar potenciais usos ou impactos desse subproduto.
- Investigar a viabilidade de uso do AISI 360.X como material para cátodos em processos de eletrólise industrial de baixa escala, considerando durabilidade, resistência à corrosão e eficiência global.
- Estender a análise econômica, incluindo o ciclo de vida dos materiais, custos de usinagem e tratamento superficial, visando maior aplicabilidade em projetos industriais ou acadêmicos de energia limpa.

## REFERÊNCIAS

- AFIFY, A. A.; HASSAN, G. K.; AL-HAZMI, H. E.; KAMAL, R. M.; et al. **Electrochemical Production of Sodium Hypochlorite from Salty Wastewater Using a Flow-by Porous Graphite Electrode**. *Energies*, Basel, v. 16, n. 12, p. 4754, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en16124754>. Acesso em: 11 jun. 2025.
- APERAM. **Endur 300: Soluções Avançadas em Aços Inoxidáveis**. Aperam South America, 2015. Disponível em: <https://brasil.aperam.com/wp-content/uploads/biblioteca/Aperam%20-%20Ficha%20T%C3%A9cnica%20ENDUR%20300%202022%202.pdf>
- APERAM. **UNS S41003 – Aço Inoxidável Lean Duplex/Ferrítico Estrutural**. Aperam South America, 2019. Disponível em: <https://brasil.aperam.com/wp-content/uploads/2015/11/DIN-WS-1.4003UNS-S41003-A%C3%A7o-Inoxid%C3%A1vel-Ferr%C3%ADtico-para-aplica%C3%A7%C3%B5es-estruturais-e-de-desgaste.pdf>
- ASM INTERNATIONAL. **ASM Metals Reference Book**. 3rd ed. Ohio: ASM International, 1993.
- ASM. **ASM Handbook: Volume 1 - Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys**. Ohio: ASM International, 1993.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM B179-14: Standard Specification for Aluminum Alloys in Ingot and Molten Forms for Castings from All Casting Processes**. West Conshohocken: ASTM International, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. **Boletim anual 2023**. São Paulo: ABEEólica, 2024. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/>. Acesso em: 5 jul. 2025.
- ATI MATERIALS. **AL-6XN® PLUS Superaustenitic Stainless Steel**. ATI Specialty Materials, 2023.
- BARD, A. J.; FAULKNER, L. R. **Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications**. 2nd ed. New York: Wiley, 2001.
- BARROS, Pedro Henrique Moreira. **Estudo da Influência da Hidrogenação Eletrolítica no Comportamento Mecânico dos Aços Inoxidáveis AISI 316 (Austenítico) e AL-6XN PLUS® (Superaustenítico)**. 2024. 76 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.
- CALLISTER, W. D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 8th ed. New York: Wiley, 2012.
- CARVALHO, José Antônio. **Tecnologia dos Materiais**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2000. v. 1, 320 p.
- CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. 7. ed., São Paulo: ABM, 2005. 586 p.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica**. Volume 3: Tratamentos Térmicos e de Superfície. São Paulo: McGraw-Hill, 1988.

COSTA E SILVA, A. L. **Metalurgia Física dos Aços Inoxidáveis**. Rio de Janeiro: ABM, 2021.

CUPERTINO-MALHEIROS, L. et al. **Hydrogen uptake kinetics of cathodic polarized metals in aqueous electrolytes**. *Corrosion Science*, 2024. Disponível em: <https://arxiv.org/html/2403.01176v1>. Acesso em: 21 jul. 2025.

DAVIS, Joseph R. (Ed.). **Stainless Steels**. Illustrated ed. Materials Park (OH): ASM International, 1994. 576 p.

FERREIRA, A. M.; MOURA, A. S. **Fundamentos da Metalurgia dos Aços Carbono**. São Paulo: Edgard Blücher, 2016.

FRANKS, R. J. **Hydrogen Production Technologies: Current State and Future Trends**. *Journal of Power Sources*, v. 502, p. 230–245, 2021.

FONSECA, M. V. **Metalurgia Física dos Aços Maraging**. Rio de Janeiro: ABM, 2021.

GALLINA, André L.; DIAS, Bianca V.; RODRIGUES, Paulo Rogério P.. **Aplicação de Aços Inoxidáveis na Geração de Hidrogênio como Combustível**. *Revista Virtual de Química*, [S.L.], v. 6, n. 2, p. 224-234, out. 2013. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.5935/1984-6835.20140016>. Disponível em: <http://www.uff.br/rvq>. Acesso em: 27 jan. 2025.

HAMANN, C. H.; HAMNETT, A.; VELOX, W. **Electrochemistry**. 2. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2007. Acesso em: 10 jul. 2025

HOSSEINI, H. R. M. et al. **Effect of Modifiers on the Microstructure and Mechanical Properties of Al–Si–Cu Cast Alloys**. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 9, n. 5, p. 10611–10621, 2020.

IRENA. **Green Hydrogen: A Guide to Policy Making**. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2020. Acesso em: 09 jul. 2025.

JIANG, Q.; CHENG, X.; JIANG, Y. **Effect of Nitrogen on Microstructure and Properties of Austenitic Stainless Steels**. *Materials Science and Engineering A*, v. 772, p. 138-147, 2020.  
KRAUSS, G. **Steels: Processing, Structure, and Performance**. Ohio: ASM International, 2005.

LASIA, A. **Electrochemical Impedance Spectroscopy and Its Applications**. New York: Springer, 2014.

LINHARES, Yan Oliveira. **Análise das Propriedades Mecânicas do Aço Maraging 300 e sua Suscetibilidade À Fragilização por Hidrogênio**. 2025. 68 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2025.

LI, Y. et al. **Electrochemical Performance of Al-Si Alloys for Hydrogen Evolution Reaction: Role of Microstructural Homogeneity**. *Electrochimica Acta*, v. 439, 141569, 2023.

NASCIMENTO, Lucas Oliveira Ramos do. **Estudo Comparativo do Comportamento Mecânico de 2 Aços Carbono Expostos à Ambiente Eletrolítico Rico em H<sub>2</sub>**. 2025. 71 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2025.

PARDAL, J. M. et al. **Caracterização microestrutural de aços maraging 300**. Revista Matéria, v. 11, n. 2, p. 158-164, 2006.

PARSONS, R. **The hydrogen electrode**. Transactions of the Faraday Society, v. 54, p. 1053–1063, 1958. Acesso em: 11 jul. 2025

PHILLIPS, Robert & Gannon, William & Dunnill, Charles. (2019). Chapter 2. **Alkaline Electrolysers**. DOI: 10.1039/9781788016049-00028. Acesso em: 10 jul. 2025

SAE HANDBOOK. SAE J403: **Chemical Compositions of SAE Carbon Steels**. Warrendale: SAE International, 2004.

SALES, Paulo Daniel M. R.. **Estudo da Fragilização por Hidrogênio em Aços Inoxidáveis QN 1803 e 430 Submetidos À Hidrogenação Eletrolítica**. 2024. 75 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.

SANDMEYER. **Sandmeyer Steel Company: Stainless Steel Plate Products**. Philadelphia, 2014.

SANJARI, M. et al. **Evolution of Al<sub>2</sub>Cu Phase and Its Effect on Microstructure and Properties of Al-Si Alloys**. *Materials Characterization*, v. 188, 111938, 2022.

SANTIAGO, Pedro Queiros. **Estudo da Fragilização por Hidrogênio em Aços Inoxidáveis UNS S41003 e ENDUR 300 Submetidos à Hidrogenação Eletrolítica**. 2023. 59 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.

SERPA, Egídio. **Hidrogênio Verde no Ceará: custo de produzir ainda é muito alto**. Diário do Nordeste. Fortaleza, p. 01-06, 22 jan. 2025.

SHA, W.; GUO, Z. **Maraging Steels: Modelling of Microstructure, Properties and Applications**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2009.

SILVA, Lucas Anastácio da Costa e. **Estudo do Comportamento Mecânico do Aço INOX 410S e Aço Carbono SAE 1008 Submetidos À Hidrogenação Eletrolítica**. 2025. 66 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2025.

SILVA, M. J. **Metalurgia dos Aços Inoxidáveis**. São Paulo: ABM, 2010.

SILVA, Sara Gomes da. **Análise da Suscetibilidade À Fragilização por Hidrogênio do Aço Maraging 300 Modificado com 0,64% de Nióbio**. 2025. 74 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2025.

SINGH, R. **Stainless Steels: An Introduction and Their Recent Developments**. Materials Performance and Characterization, v. 9, n. 2, p. 1-18, 2020.

UFC. **Relatório de Consumo de Água e Energia 2024**. Superintendência de Infraestrutura – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.

VAN VLACK, L. H. **Elements of Materials Science and Engineering**. 4th ed. Reading: Addison-Wesley, 1984.

WANG, S. et al. **Hydrogen embrittlement in metals: A review of mechanisms and test methods**. Materials Science and Engineering A, v. 586, p. 1-11, 2013.

ZHANG, J. **Understanding the Schaeffler Diagram: Stainless Steel Phase Prediction**. Journal of Materials Science, v. 56, p. 3210-3218, 2021.

ZHANG, X. et al. **Advances in hydrogen production, storage and utilization for sustainable energy applications**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 49, n. 2, p. 1000-1015, 2024.

ZENG, K.; ZHANG, D. **Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications**. Progress in Energy and Combustion Science, v. 36, n. 3, p. 307–326, 2010.