

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE-FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FRANCINE SILVA DA ROSA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA NO
COMPORTAMENTO CORROSIVO DE FOLHAS DE FLANDRES USADAS EM
ENLATADOS ALIMENTÍCIOS**

RIO GRANDE

2026

FRANCINE SILVA DA ROSA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA NO
COMPORTAMENTO CORROSIVO DE FOLHAS DE FLANDRES USADAS EM
ENLATADOS ALIMENTÍCIOS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande-FURG como requisito para obtenção do título de “Mestre em Engenharia Mecânica” – Área de Concentração: Engenharia de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Luciano Biehl.

Coorientadora: Profa. Dra. Fernanda Trombetta.

RIO GRANDE, RS

2026

Ficha Catalográfica

R788e	<p>Rosa, Francine Silva da</p> <p>Estudo da influência da deformação plástica no comportamento corrosivo de folhas de flandres usadas em enlatados alimentícios / Francine Silva da Rosa – 2026. 68 f.</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2026.</p> <p>Orientador: Dr. Luciano Biehl Coorientadora: Dra Fernanda Trombetta</p> <p>1. Engenharia Mecânica. 2 Folha de flandres 3. Corrosão. 4. Deformação mecânica. 5. Alimentos enlatados. I. Biehl, Luciano. II. Trombetta, Fernanda. III. Título.</p> <p>CDU 621</p>
-------	--

Catálogo na fonte: Bibliotecária Brenda Sequeira CRB10/1979



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



Ata nº 1/2026 da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos vinte e nove dias do mês de janeiro de dois mil e vinte e seis, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às treze horas e trinta minutos, online via webconferência, a que se submeteu a discente **FRANCINE SILVA DA ROSA**, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a linha de pesquisa de Engenharia de Soldagem e Materiais, com o seguinte título: **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA NO COMPORTAMENTO CORROSIVO DE FOLHAS DE FLANDRES USADAS EM ENLATADOS ALIMENTÍCIOS**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Luciano Volcanoglo Biehl, Jorge Luis Braz Medeiros e o convidado José de Souza sob a presidência do Professor Luciano Volcanoglo Biehl. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

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

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

Assinaturas:

1.  Documento assinado digitalmente
LUCIANO VOLCANOGLO BIEHL
Data: 29/01/2026 14:48:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

CPF: 575.195.100-00
2.  Documento assinado digitalmente
JORGE LUIS BRAZ MEDEIROS
Data: 29/01/2026 15:05:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

CPF: 588.871.210-87
3.  Documento assinado digitalmente
JOSE DE SOUZA
Data: 29/01/2026 14:51:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

CPF: 914.626.140-00

 Documento assinado digitalmente
FRANCINE SILVA DA ROSA
Data: 29/01/2026 18:32:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>
Francine Silva da Rosa: _____

Av. Itália km 08 – Campus Carreiros – Rio Grande/RS – Caixa Postal: 474 – CEP 96203-900
Fone: (053) 3293.5218 – (053) 3293.5119 – E-mail: ppmec@furg.br

DEDICATÓRIA

À minha família, meu porto seguro!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela saúde, sabedoria e por estar sempre guiando meus passos.

Ao meu esposo e à minha filha pela paciência, compreensão e apoio incondicional durante todo o período de dedicação ao mestrado.

À minha mãe, expresso minha sincera gratidão por todo o amor, educação e esforço dedicados à minha criação.

Aos gestores da Fibraplac, que gentilmente permitiram minha dedicação aos estudos e compreenderam minhas ausências sempre que necessário.

Ao João Luis Pereira, pela escuta atenta, sensibilidade técnica e parceria no desenvolvimento da dobradeira manual empregada neste estudo, cuja contribuição foi essencial para a viabilização dos procedimentos experimentais realizados.

Aos colegas do mestrado, agradeço a parceria construída desde o início desta jornada, cuja presença e colaboração tornaram o percurso mais leve e enriquecedor.

À Universidade Federal do Rio Grande, manifesto minha gratidão pela excelência no ensino e pelo compromisso com o desenvolvimento acadêmico e profissional de seus estudantes.

Aos professores do curso de mestrado, sou profundamente grata pelo conhecimento transmitido, que foi essencial para o embasamento teórico e metodológico deste trabalho.

Agradeço ao Professor Jorge Braz pela acolhida no Campus Santo Antônio da Patrulha, pelo apoio oferecido e pela valiosa indicação que me levou ao contato com a Dra. Fernanda Trombetta.

À Profa. Dra. Fernanda Trombetta, deixo meu agradecimento especial. Seus ensinamentos metodológicos e todo o suporte fornecido foram indispensáveis para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Dr. Luciano Biehl, meu orientador, manifesto um agradecimento mais que especial pela serenidade, segurança e vasto conhecimento compartilhado ao longo de todo o processo. Sou profundamente grata por sua orientação atenta e dedicada na construção desta dissertação.

A todos os aqui mencionados, deixo meus mais sinceros agradecimentos. Cada um contribuiu de forma significativa para a realização deste estudo.

RESUMO

A folha de flandres é amplamente utilizada em embalagens alimentícias por proporcionar segurança, qualidade e aumento da vida de prateleira dos alimentos. Entretanto, impactos ocorridos durante a estocagem podem provocar deformações, comprometer o revestimento interno e favorecer a migração de estanho para o alimento, representando potencial risco à saúde. Diante desse contexto, avaliou-se a influência da deformação mecânica no comportamento corrosivo de folhas de flandres empregadas em embalagens para alimentos de origem vegetal. As amostras foram submetidas a diferentes ângulos de deformação (0°, 30° e 180°) e imersas em soluções de ácido cítrico com pH 3,0 e 4,5 por períodos de até 35 dias. A evolução do processo corrosivo foi analisada por meio de avaliação visual, medições de condutividade elétrica e ensaios eletroquímicos de polarização anódica. Os resultados indicaram intensificação da corrosão e aumento da migração de constituintes do revestimento com a redução do pH, o aumento do tempo de exposição e do grau de deformação. Verificou-se que deformações severas comprometem a integridade do verniz, favorecendo a corrosão localizada. Conclui-se que a deformação mecânica associada a meios ácidos constitui fator crítico para a durabilidade e a segurança de embalagens metálicas destinadas a alimentos.

Palavras-chave: Folha de flandres; corrosão; deformação mecânica; alimentos enlatados.

ABSTRACT

Tinplate is widely used in food packaging because it provides safety, quality, and increases the shelf life of food. However, impacts during storage can cause deformation, compromise the inner coating, and promote the migration of tin into the food, representing a potential health risk. In this context, the influence of mechanical deformation on the corrosive behavior of tinplate used in packaging for plant-based foods was evaluated. Samples were subjected to different deformation angles (0°, 30°, and 180°) and immersed in citric acid solutions with pH 3.0 and 4.5 for periods of up to 35 days. The evolution of the corrosive process was analyzed through visual assessment, electrical conductivity measurements, and electrochemical anodic polarization tests. The results indicated an intensification of corrosion and an increase in the migration of coating constituents with a reduction in pH, an increase in exposure time, and an increase in the degree of deformation. It was found that severe deformations compromise the integrity of the varnish, favoring localized corrosion. It is concluded that mechanical deformation associated with acidic environments is a critical factor for the durability and safety of metal packaging intended for food.

Keywords: Tinplate; corrosion; mechanical deformation; canned foods.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Costura dupla.....	21
Figura 2 – Estrutura esquemática da folha de flandres mostrando as principais camadas funcionais.....	22
Figura 3 – Perda de estabilidade da amostra: a) sem presença de deformação; b) modelo Marciniak; c) com presença de diversas linhas de deslizamento.....	23
Figura 4 – Estrutura do material deformado após ensaio de tração biaxial hidráulica na direção de laminação 0°.....	24
Figura 5 – Concentração de íons Sn e Fe em solução de ácido cítrico em diferentes temperaturas.....	29
Figura 6 – Fluxograma da metodologia.....	33
Figura 7 – Dobradiça de tamanho médio.....	35
Figura 8 – Cantoneira.....	35
Figura 9 – Parafusos 0,35 cm × 1,2 cm.....	36
Figura 10 – Rebite (0,4 cm × 1 cm).....	36
Figura 11 – Dobradeira manual.....	37
Figura 12 – Medidor de pH de bancada PH140 da marca Simpla.....	38
Figura 13 – Condutivímetro de bancada W12D da marca Bel.....	39
Figura 14 – Potenciostato PGSTAT302N da marca Metrohm Autolab.....	40
Figura 15 – Amostras de soluções de corpos de prova com pH 3,0 coletadas em diferentes períodos.....	43
Figura 16 – Amostras de soluções de corpos de prova com pH 4,5 coletadas em diferentes períodos.....	43
Figura 17 – Corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 3,0) com deformação de 0°, após 30 minutos.....	46
Figura 18 – Corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 3,0) com deformação de 30°, após 30 minutos.....	46
Figura 19 – Corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 3,0) com deformação de 180°, após 30 minutos.....	46
Figura 20 – Corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 3,0) com deformação de 0°, após 15 dias.....	47

Figura 21 – Corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 3,0) com deformação de 30°, após 15 dias.....	47
Figura 22 – Corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 3,0) com deformação de 180°, após 15 dias.....	47
Figura 23 – Corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 3,0) com deformação de 0°, após 35 dias.....	48
Figura 24 – Corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 3,0) com deformação de 30°, após 35 dias.....	48
Figura 25 – Corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 3,0) com deformação de 180°, após 35 dias.....	48
Figura 26 – Corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 4,5) com deformação de 0°, após 30 minutos.....	49
Figura 27 – Corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 4,5) com deformação de 30°, após 30 minutos.....	49
Figura 28 – Corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 4,5) com deformação de 180°, após 30 minutos.....	49
Figura 29 – Corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 4,5) com deformação de 0°, após 15 dias.....	50
Figura 30 – Corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 4,5) com deformação de 30°, após 15 dias.....	50
Figura 31 – Corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 4,5) com deformação de 180°, após 15 dias.....	50
Figura 32 – Corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 4,5) com deformação de 0°, após 35 dias.....	51
Figura 33 – Corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 4,5) com deformação de 30°, após 35 dias.....	51
Figura 34 – Corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 4,5) com deformação de 180°, após 35 dias.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização da polpa de cupuaçu e do purê adoçado.....	26
Tabela 2 – Aceleradores de corrosão e seus modos de reação.....	28
Tabela 3 – Resultados de montagem do circuito elétrico equivalente.....	30
Tabela 4 – Medições de pH das soluções contidas em produtos enlatados.....	42
Tabela 5 – Parâmetros experimentais e densidade de corrente de corrosão (i_{corr}) dos corpos de prova de folha de flandres.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS

ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ATR–FTIR	Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier com reflexão total atenuada
CE	Contraeletrodo
DR	Double Reduced (duplamente reduzido)
EIS	Espectroscopia de impedância eletroquímica
EN	Ruído eletroquímico
ICP-MS	Espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado
pH	Potencial hidrogeniônico
RE	Eletrodo de referência
TMA	Trimetilamina
TMAO	Óxido de trimetilamina
TSS	Sólidos solúveis totais
WE	Eletrodo de trabalho

LISTA DE SÍMBOLOS

°	Grau (unidade de ângulo)
°C	Grau Celsius
A	Ânodo
Cc	Capacitância do revestimento (F/cm ²)
Cdl	Capacitância da dupla camada elétrica (F/cm ²)
cm ²	Centímetro quadrado
e ⁻	Elétron
E	Potencial aplicado (V)
E _{corr}	Potencial de corrosão (V)
Fe	Ferro
Fe ²⁺	Íon ferroso
FeSn ₂	Fase intermetálica ferro–estanho
F	Farad
g·m ⁻²	Grama por metro quadrado
H ⁺	Íon hidrogênio
H ₂	Gás hidrogênio
I	Densidade de corrente (A/cm ²)
i _{corr}	Densidade de corrente de corrosão (μA/cm ²)
mA	Miliampère
mg/kg	Miligrama por quilograma
mL	Mililitro
mm	Milímetro
mol/L	Mol por litro
NaCl	Cloreto de sódio
O ₂	Oxigênio
pH	Potencial hidrogeniônico
Rc	Resistência do revestimento (Ω·cm ²)
Rct	Resistência de transferência de carga (Ω·cm ²)
Sn	Estanho
Sn ²⁺	Íon estanhoso

V	Volt
V/s	Volt por segundo
η	Sobretensão (V)
β_a	Inclinação de Tafel anódica (V/dec)
β_c	Inclinação de Tafel catódica (V/dec)
$\Omega \cdot \text{cm}^2$	Ohm por centímetro quadrado
$\mu\text{A}/\text{cm}^2$	Microampère por centímetro quadrado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivo geral	18
1.2	Objetivos específicos	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1	Embalagens de latas utilizando folha de flandres	20
2.2	Relação entre a deformação e a ruptura da camada da folha de flandres ..	22
2.3	A interação dos diferentes tipos de alimentos em relação ao revestimento aplicado na folha de flandres.....	25
2.4	Processo corrosivo na embalagem da folha de flandres	27
2.5	Relação da influência do tempo na folha de flandres deformado.....	30
3	MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1	Material	34
3.2	Métodos	34
3.2.1.	Preparação das amostras.....	34
3.2.1.1	Deformação em ângulos.....	35
3.2.1.2	Dobreira manual.....	35
3.2.2	Avaliação visual	37
3.2.3.	Análise de pH nas soluções dos alimentos enlatados.....	37
3.2.4.	Ensaio de Imersão.....	38
3.2.5.	Análise de condutividade nas soluções de imersão.....	39
3.2.6.	Análise de polarização anódica.....	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1	Avaliação dos valores de pH de soluções de alimentos enlatados	42
4.2	Avaliação visual da coloração do meio de imersão ao longo do tempo	43
4.3	Avaliação da condutividade elétrica do meio de imersão ao longo do tempo.....	44
4.4	Análise visual dos corpos de prova ao longo do tempo	45
4.5	Polarização	52
4.5.1	Influência do pH do meio eletrolítico.....	56

4.5.2	Influência do ângulo de deformação na densidade de corrente.....	57
4.5.3	Influência do tempo de imersão.....	58
5	CONCLUSÕES.....	59
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	61
7	REFERÊNCIAS	62
7.1	Referências nominais	62
7.2	Referências por data	67
7.3	Referências por Qualis	67
7.4	Referências por estrado	68

1 INTRODUÇÃO

A embalagem exerce papel fundamental na cadeia produtiva de alimentos, pois garante proteção física e preserva as características químicas, microbiológicas e sensoriais do produto. Entre os materiais disponíveis, as embalagens metálicas se destacam pela elevada resistência mecânica, excelente barreira a gases, luz e umidade (DESHWAL et al., 2019). A combinação entre a resistência estrutural do aço e a proteção anticorrosiva do estanho confere à folha de flandres propriedades essenciais para o armazenamento prolongado de alimentos de origem vegetal e animal (BUCULEI et al., 2014).

A camada de estanho atua como uma barreira física e eletroquímica, reduzindo a interação direta entre o aço e o alimento, além de apresentar comportamento de proteção sacrificial em ambientes corrosivos (DESHWAL et al., 2019). Para ampliar essa proteção, revestimentos orgânicos internos, como vernizes epóxi ou fenólicos, são aplicados com o objetivo de minimizar a corrosão e restringir a migração de íons metálicos para o alimento acondicionado (BUCULEI et al., 2014).

Entretanto, durante as etapas de transporte, estocagem e manuseio, as embalagens podem sofrer impactos mecânicos e deformações, capazes de comprometer a integridade do revestimento protetor. Estudos indicam que as deformações podem gerar microfissuras e descontinuidades nas camadas de estanho e verniz, expondo o material e favorecendo reações corrosivas (TEIXEIRA; PEREIRA, 2016).

A corrosão interna das latas metálicas é um fenômeno complexo, influenciado por fatores como pH, composição química do alimento, presença de oxigênio, temperatura de armazenamento e estado físico da embalagem (KASSOUF et al., 2013). Alimentos com maior acidez ou com compostos orgânicos agressivos tendem a acelerar os processos eletroquímicos, intensificando a liberação de elementos metálicos da embalagem para o meio alimentar (BUCULEI et al., 2014).

Entre os metais passíveis de migração, o estanho (Sn) destaca-se, pois, embora apresente menor toxicidade em relação a outros metais pesados, sua ingestão em altas concentrações pode causar efeitos adversos. Por esse motivo,

órgãos reguladores estabelecem limites máximos para sua migração em alimentos (KASSOUF et al., 2013). Pesquisas recentes demonstram que a migração de estanho é fortemente dependente do estado físico da embalagem, sendo significativamente maior em latas que apresentam danos mecânicos ou degradação dos revestimentos internos (TEIXEIRA; PEREIRA, 2016). Além disso, o tempo de armazenamento desempenha papel relevante, uma vez que a exposição prolongada do metal a meios corrosivos intensifica os processos de dissolução e liberação de íons metálicos (BUCULEI et al., 2014).

Nesse contexto, torna-se essencial compreender a influência da deformação mecânica na folha de flandres, considerando diferentes ângulos de deformação e seus efeitos sobre a integridade do revestimento. A comparação entre embalagens íntegras e deformadas possibilita identificar limites de segurança estrutural e funcional, contribuindo para o aprimoramento dos processos de fabricação e do controle de qualidade (DESHWAL et al., 2019).

Portanto, este estudo propõe-se a investigar a influência da deformação em folhas de flandres utilizadas em enlatados alimentícios de origem vegetal, avaliando as condições que favorecem a migração de estanho para o alimento, o tempo necessário para o início desse processo e os impactos diretos na qualidade e segurança alimentar. Os resultados esperados poderão subsidiar o desenvolvimento de embalagens mais resistentes, seguras e adequadas às exigências regulatórias, fortalecendo a proteção ao consumidor e a sustentabilidade da indústria de alimentos.

1.1 Objetivo geral

Estudar a influência da deformação em folhas de flandres utilizadas em enlatados alimentícios de origem vegetal, visando avaliar a camada de estanho/resina nas embalagens e suas características protetoras após sofrerem diferentes graus de deformação, analisando quais condições favorecem a migração de estanho para o alimento, em quanto tempo, após a deformação, inicia-se a migração do estanho para o meio, além de comparar os resultados de amostras em perfeitas condições com amostras submetidas a diferentes graus de deformação e avaliar como essas alterações impactam a qualidade e a segurança alimentar dos produtos enlatados.

1.2 Objetivos específicos

Para que o objetivo geral seja atendido, alguns objetivos específicos foram descritos:

- a) Avaliar a influência do meio presente dentro da lata de flandres em relação ao processo de corrosão;
- b) Avaliar a influência dos diferentes graus de deformação (0° , 30° e 180°) na camada depositada de estanho/resina, por meio da polarização anódica.
- c) Avaliar a influência do tempo em relação à corrosão, por meio de ensaio de imersão.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Com o objetivo de fundamentar os assuntos abordados neste estudo, na sequência, estão relacionados os conceitos teóricos pertinentes ao tema.

2.1 Embalagens de latas utilizando folha de flandres

De acordo com a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA,2020) é considerado embalagem o material que entra em contato direto com os alimentos, devendo ter a finalidade de contê-los, desde o momento da sua fabricação até a sua entrega ao consumidor final, protegendo contra agente externos, alterações, contaminações e adulterações. Para isso deve-se controlar fatores importantes como a umidade, oxigênio, luz e ser uma barreira aos micro-organismos presente no meio (JORGE,2013).

Segundo Twede (2010) a escolha dos materiais para a embalagem depende das características do alimento e do desempenho esperado pela embalagem. Existem quatro materiais básicos que podem ser utilizados como embalagem, sendo eles o vidro, plástico, materiais provenientes da madeira (incluindo derivados como o papel e papelão) e o metal.

De todos os materiais existentes, as embalagens metálicas utilizadas na forma de latas são as que conseguem impedir a entrada de luz e oxigênio, a fim de preservar as propriedades nutricionais, a qualidade e o sabor dos alimentos (FERNANDES et al.; 2015). Além de ter o maior desempenho em relação a tolerância ao calor, resistência física, durabilidade, ausência de gosto e cheiro, rigidez, formação de vinco e etc (TWEDE, 2010).

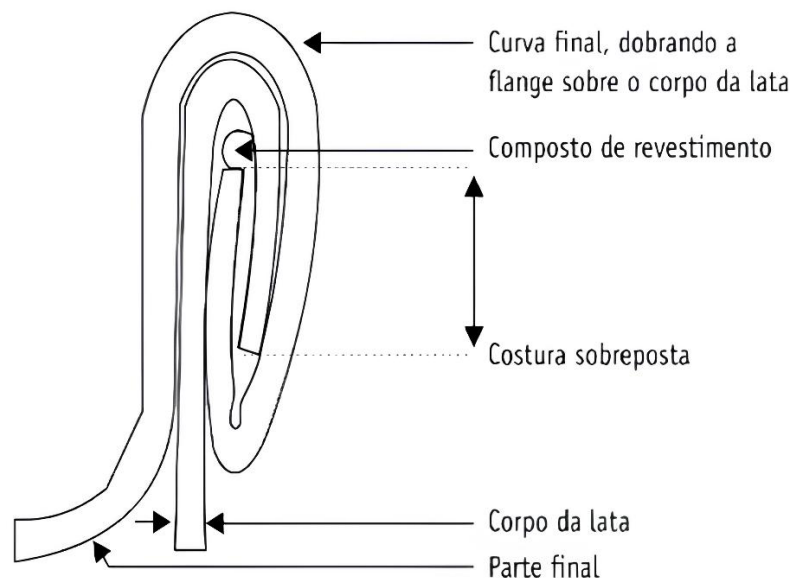
De acordo com Barão (2011) as latas metálicas podem ser classificadas quanto ao número de peças podendo ser de:

- Três peças: Possuindo costura no corpo da lata, tampa e fundo;
- Duas peças: Possuindo uma única peça com fundo e uma tampa.

Durante parte da história das latas de folha de flandres, elas foram fabricadas em três partes (TWEDE, 2010). Já as latas de duas peças podem ser compostas por folha de flandres, folha cromada ou até mesmo alumínio (BARÃO, 2011). Na lata de

três partes, a tampa e o fundo são costurados ao corpo cilíndrico soldado, uma pelo fornecedor da lata e outra após o envase. Na Figura 1, mostra a costura dupla, ponto crítico pois deve formar uma forte vedação da lata para a saída de ar (TWEDE, 2010).

Figura 1 - Costura dupla



Fonte: TWEDE (2010).

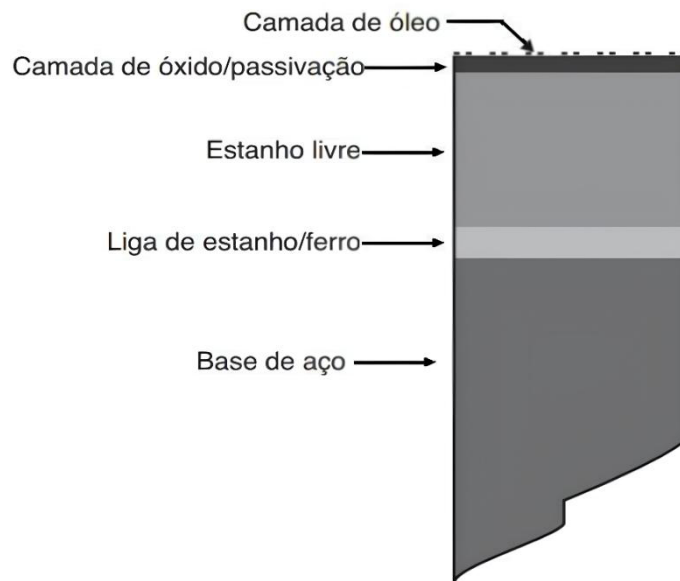
Já as latas de duas partes podem ser obtidas através da estampagem do metal a partir de uma placa metálica em forma de disco, utilizando altas pressões e matrizes progressivas. Após o envase, aplica-se a costura dupla no topo da ponta da lata (TWEDE; 2010).

A folha de flandres é uma das embalagens metálicas mais populares utilizadas nas indústrias conserveiras, chegando a representar 80% de todas as latas produzidas globalmente (ARMSTRONG,1992). Este material refere-se à chapa cujo material é heterogêneo de estrutura estratificada, constituída por uma chapa de aço, revestida por estanho em ambas as faces ($2,8-11,2 \text{ g/m}^2$) e com espessura entre 0,15 e 0,40 mm (JORGE,2013). As latas com folha de flandres têm um aço de baixo teor de carbono, na qual a composição geralmente está entre a faixa de 0,06 a 0,15% de carbono, faixa que obtém a capacidade de deformar a estampagem sem se romper (SILVA, 1969).

A aplicação do estanho na chapa de aço ocorre através da eletrodeposição, a partir de soluções aquosas de sais de estanho, resultando na obtenção do brilho e formação da camada de liga FeSn_2 (JORGE,2013). Conforme a utilização final, poderá ser encontrados diferentes níveis de carbono, silício, manganês, fósforo, cobre e

enxofre. Após a eletrodeposição, a camada é passivada por tratamento eletrolítico em dicromato de sódio, para ter uma superfície mais estável e resistente, e coberta com uma camada fina de óleo, conforme é ilustrado através da Figura 2 (CAMPBELL-PLATT, 2015).

Figura 2 - Estrutura esquemática da folha de flandres mostrando as principais camadas funcionais



Fonte: Adaptado pela autora com base em Robertson (2016).

O aço necessita de um revestimento para evitar enferrujar, sendo assim as folhas são revestidas com um verniz orgânico para proteger contra corrosão. A folha de flandres e o verniz também protegem o ferro de ser dissolvido em produtos alimentícios (TWEDE, 2010).

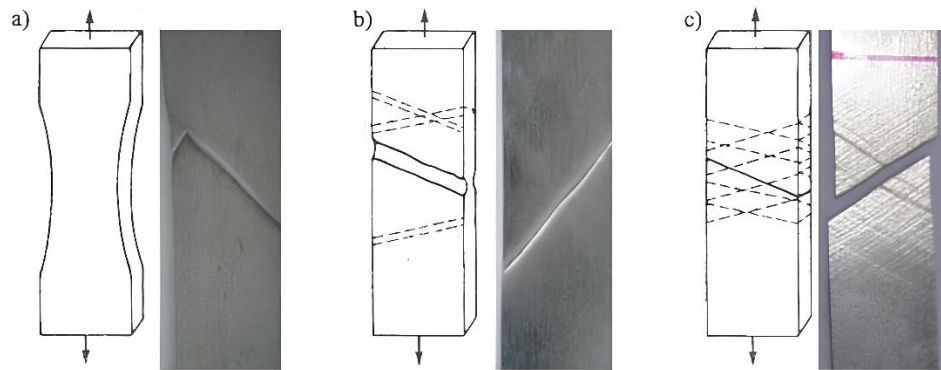
Alimentos mais ácidos necessitam de um revestimento maior de estanho ou verniz (ou até mesmo os dois). A espessura do revestimento da folha de flandres da superfície externa é normalmente mais fina, pois é exposta somente à umidade do ambiente e não ao seu conteúdo (TWEDE, 2010).

2.2 Relação entre a deformação e a ruptura da camada da folha de flandres

A precisão na avaliação das características mecânicas é fundamental para compreender como os materiais se deformam, principalmente quando se trata de deformação plástica, como é o caso de chapas de baixo carbono (SPIŠÁK et al., 2012). Este tipo de deformação geralmente ocorre uniformemente ao longo de todo o

comprimento da amostra, até uma determinada fase do processo em que ocorre a perda de estabilidade (FIGURA 3), que se manifesta através do estreitamento e afinamento local da amostra (SPIŠÁK et al., 2016).

Figura 3 - Perda de estabilidade da amostra a) sem presença de deformação, b) modelo Marciniak, c) Com a presença de diversas linhas de deslizamento

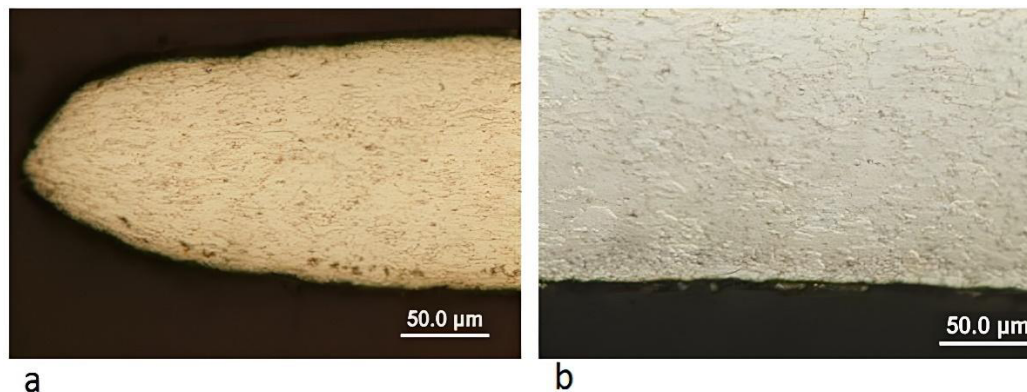


Fonte: Norma Europeia EN 10202:2001, 2001

A perda de estabilidade da placa surge como uma alteração local em sua espessura ao longo de uma linha específica. Esse tipo de deformação pode ser observado como um adelgaçamento local, sendo visível na superfície da amostra como ilustrado a Figura 4 1b (MARCINIAK;1978). O desgaste local continua até que as tiras corrediças apareçam em toda a sua extensão. Quando ocorre a perda de estabilidade do material, esta alteração local surge como faixas de cisalhamento (FIGURA 4 1c) quando a carga atinge o máximo (Hill, 1952 e Swift, 1952).

Em 2016 foi publicado estudo “*Analysis of Plastic Deformation of Double Reduced Sheets*” de SPIŠÁK , onde foram realizados ensaios de tração, entre eles o ensaio de tração biaxial hidráulico, obtendo um alongamento com média de 13%, cuja microestrutura do material deformado era uniforme na área de falha, tipicamente plástica com um estreitamento considerável (Figura 4 a, b). Este comportamento de fratura e a localização da deformação são explicadas pela teoria de Marciniak, que sugere que a localização da deformação ocorre em áreas com forte heterogeneidade do material. Além disso, a falta de homogeneidade do material pode causar alterações na microgeometria da superfície, causando defeitos superficiais (MARCINIAK;1978 e SPIŠÁK et al.;2016).

Figura 4. Estrutura do material deformado após ensaio de tração biaxial hidráulica na direção de laminação 0°, onde a área de fratura (a) e o material de base (b).



Fonte: SPIŠÁK et al. (2016)

Outro estudo relevante é o *"Failure of coatings of tinplates"* de Spišák, et al. de 2015, no qual foram analisadas folhas finas estanhadas (eletroliticamente, duplamente reduzidas em ambas as faces com espessura de 0,18mm e que tiveram recozimento contínuo com envelhecimento artificial embutido com aproximadamente 450°C) a fim de obter informações sobre as falhas dos revestimentos de estanho, suas causas e sobre o comportamento após deformado. Nesse estudo foi revelado que na localização da deformação plástica máxima, o revestimento de estanho obteve falhas, decorrentes de trincas transversais, sem a divisão das partículas do revestimento e sem a decoesão na interface revestimento-substrato. O estudo também revelou que durante o processo de desenho o local crítico com deformação máxima, é o local onde o fundo e a parede cilíndrica do copo se encontram, este local e a magnitude da deformação dependem claramente do raio de arredondamento do copo, sendo o ponto crítico nas latas de duas peças é, o local onde o fundo da topo e a parede cilíndrica se encontram, sendo neste local onde o raio de arredondamento é significativamente menor do que no fundo da lata isso se deve aos requisitos para abertura da lata. Esta investigação deverá diminuir a falha corrosiva das embalagens de estanho causada pelo enchimento da lata apenas nesses locais críticos da embalagem (SPIŠÁK et al.;2015).

Sabe-se também que, durante o processo de laminação a frio, pode ocorrer deformação na folha de flandres devido ao aperto, resultando em tensões residuais, deformação plástica e modificação da microestrutura, inclusive o artigo *"Irregularity of Microhardness and Microstructure of Low-Carbon Steel Rolled in a Two-Stand Rolling-Leveling Mill"* de Ivanov, V. et al de 2023 estuda as variações na microdureza e

microestrutura do aço de baixo carbono após o processo de laminação. No estudo descobriu-se que as camadas de metal adjacentes às superfícies de estanho da folha de flandres foram submetidas a maior deformação pelos rolos, resultando em zonas superficiais com maior dureza e alongamento dos grãos. Já as camadas subsuperficiais apresentam menor dureza e deformação. As regiões centrais da chapa exibem os maiores valores de dureza, possivelmente devido à tensão significativa entre as bancadas do laminador. Essas descobertas indicam que a laminação a frio pode afetar o desempenho do material em aplicações práticas, sendo essencial controlar os parâmetros de laminação para otimizar as propriedades do material (IVANOV, V. et al.; 2023).

2.3 A interação dos diferentes tipos de alimentos em relação ao revestimento aplicado na folha de flandres

A segurança alimentar e a vida útil dos alimentos dependem de fatores ligados ao produto, processo de fabricação e seu contato com a embalagem. A utilização de materiais metálicos sem a proteção adequada em embalagens, podem fazer com que o material sofra corrosão pelo alimento que está presente no meio (AUGUSTO, 2017). A folha de flandres especificamente tem os substratos que combinam as vantagens mecânicas do aço com o aumento da resistência à corrosão e a estética do revestimento de estanho, mas vários tipos de alimentos podem facilitar o processo de corrosão (ÁLVAREZ, et al.,2014).

Conforme o estudo de Patrick (1976) "*Internal corrosion of tinsplate food containers*", ingredientes como açúcar, sal, antocianinas, óxido de trimetilamina, alguns corantes e agentes complexantes também desempenham um papel significativo na degradação do revestimento da folha flandres. Além disso, a presença de nitratos nos alimentos foi identificada como um fator crítico para a corrosão, inclusive foi verificado que o pH abaixo de 6,24 tem a capacidade de oxidar e penetrar a camada de estanho, expondo o aço subjacente.

Ácidos orgânicos presentes em alimentos enlatados podem acelerar o processo corrosivo nas folhas de flandres, inclusive o artigo "*Effect of the combination of organic acid solutions on tinsplate corrosion*" de YILDIRIM e KIZILKAYA de 2022 estuda o impacto de diferentes combinações de ácidos orgânicos na corrosão da folha

de flandres. Ácidos orgânicos, como ácido cítrico, ácido acético e ácido láctico, presentes em muitos alimentos, podem interagir com o revestimento de estanho, acelerando o processo de corrosão. Este estudo mostra que a combinação de diferentes ácidos não resulta em uma formação de uma camada protetora de passivação, em comparação com os meios à base de ácido único. Inclusive o estudo mostra que a combinação de ácido cítrico, ácido acético e cloreto de sódio foi a mais agressiva, resultando em maior degradação do revestimento de estanho.

Por outro lado, o estudo "*Influence of side stripe on the corrosion of unlacquered tinplate cans for food preserves*" de MONTANARI e ZURLINI de 2018 estudou a utilização de latas sem a faixa de revestimento na costura lateral para embalagens de frutas e de produtos com média acidez (pH = 4,0), porém este estudo revelou um resultado positivo confirmando que a ausência de uma faixa lateral não afeta a taxa de corrosão da costura e não leva à corrosão localizada.

O caso do purê adoçado de cupuaçu, analisado por Freire et al. (2016) no artigo "*Food-packaging interaction on the stability of canned sweetened cupuaçu (theobroma grandiflorum schum.) puree*" de Freire et al. em 2016, investigou como o purê adoçado de cupuaçu interage com o revestimento de estanho da folha de flandres, o estudo realizou a caracterização do cupuaçu, onde foi constatado um baixo pH, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização da polpa de cupuaçu e do purê adoçado.

Parâmetro	Polpa	Purê adoçado
Matéria seca (g 100g ⁻¹)	9.3 ± 0.6	68 ± 5
Atividade aquática	0.9913 ± 0.0006	0.84 ± 0.02
Cinza total (g 100g ⁻¹)	0.69 ± 0.05	0.33 ± 0.02
TSS (°Brix)	8.8 ± 0.7	60 ± 1
TTA	1.5 ± 0.1	0.80 ± 0.05
pH	3.54 ± 0.05	3.75 ± 0.02

Fonte: Adaptado pela autora com base em Freire (2016).

No 30º dia de armazenamento foi constatada a migração do estanho e do ferro para o meio, a qual permaneceu até o final dos 240 dias (prazo de validade), porém os níveis de contaminação foram inferiores à 250 mg.kg⁻¹ (concentração máxima permitida para alimentos pelas normas brasileiras), mas mostraram que houve

influência do pH e da acidez elevada causada pelos ácidos orgânicos naturais do cupuaçu, e que são um fator crítico na interação com a folha de flandres (FREIRE; 2016).

2.4 Processo corrosivo na embalagem da folha de flandres

De acordo com Augusto (2017) a corrosão é a modificação de um material metálico, pela sua interação eletroquímica ou química, através de um meio de exposição, formando produtos de corrosão e liberando energia:

A corrosão por processos eletroquímicos apresenta mecanismos idênticos sempre constituídos por regiões nas quais há formação de ânodos e cátodos, entre as quais há circulação de elétrons e de íons. Os metais são oxidados liberando os cátions para o meio e deixando os elétrons na superfície metálica (ânodo), havendo em meios aquosos a evolução do gás hidrogênio. Quanto maior a concentração de íons hidrogênio, menor o pH e, consequentemente, maior tende a ser a taxa de corrosão (AUGUSTO; 2017).

Segundo CAMPBELL- PLATT (2015) o ferro e estanho são metais que tendem a corroer principalmente em ambientes aquosos, visto que a reação de corrosão ou ionização pode ser equilibrada através da redução dos íons de hidrogênio como mostra as fórmulas 1 e 2:



A taxa da reação terá tendência a aumentar se a concentração dos íons de hidrogênio for aumentada. Se houver O_2 estiver disponível, a reação de corrosão será equilibrada pela absorção de O_2 e no caso do estanho, as reações equilibradas ficariam:



Os aceleradores e inibidores de corrosão são facilmente encontrados em produtos alimentícios, por se tratar de sistemas complexos que por sua vez tem entre suas composições ingredientes que são aceleradores desses processos como: oxigênio, nitratos, pigmentos, compostos de enxofre, trimetilaminas etc.

(AUGUSTO;2017). De acordo com o estudo *Internal corrosion and shelf-life of food cans and methods of evaluation* de Mannheim et al. (1992) na folha de flandres podemos encontrar algumas reações típicas de corrosão referentes a esses aceleradores e seus equivalentes estequiométricos do estanho dissolvido, como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Aceleradores de corrosão e seus modos de reação

Acelerador de corrosão	Produto da redução	Equivalente em peso
Próton (H ⁺)	H ₂	1 mL H ₂ = 5,3 mg Sn ²⁺
Oxigênio (O ₂)	H ₂ O	1 mL O ₂ = 10,6 mg Sn ²⁺
Dióxido de enxofre (SO ₂)	H ₂ S	1 mL SO ₂ = 5,5 mg Sn ²⁺
Enxofre (S)	H ₂ S	1 mL S = 3,7 mg Sn ²⁺
Nitrato (NO ₃)	NH ₃	1 mg NO ₃ = 7,65 mg Sn ²⁺
Óxido de trimetilamina (TMAO)	TMA	1 mg TMAO = 1,57 mg Sn ²⁺

Fonte: Mannheim (1982)

O oxigênio e os sais dissolvidos são capazes de acelerar o processo corrosivo devido a ação despolarizante (AUGUSTO, 2017)

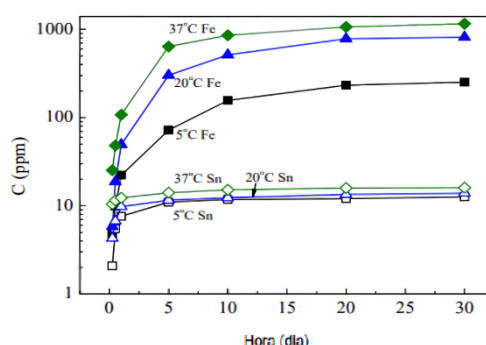
O estudo recente “*Sage Extract as a Natural Source of Corrosion Inhibitor for Tinplate in 3.0 % NaCl*” de Dent e Fuchs-Godec de 2021, investigou-se o potencial do efeito inibitório do extrato de sálvia sobre a corrosão folha-de-flandres em solução de cloreto de sódio a 3,0%. O estudo analisou as amostras redondas de folha-de-flandres (aço carbono revestido de estanho com espessura de revestimento de aproximadamente 2,8 g/m² de estanho) e revelou através da análise de espectroscopia de impedância eletroquímica que o extrato de sálvia poderia ser utilizado como um inibidor, apresentando eficiência de 94,1% de inibição de corrosão na folha-de-flandres em NaCl a 3,0% em uma concentração de massa de 0,2 mg/L e temperatura de 25 °C, já os resultados revelados através da polarização potenciodinâmica mostraram que o extrato de sálvia age como inibidor do tipo misto a considerar que os resultados do potencial de corrosão não variam significativamente na direção do cátodo ou do ânodo, e sua eficiência de inibição é de até 82,5%. Os resultados da espectroscopia infravermelha por transformada de Fourier com reflexão total atenuada (ATR – FTIR) mostram que o efeito inibitório do extrato de sálvia acontece decorrente da presença de uma camada de passivação na parte superior da

folha de flandres, que provém de compostos orgânicos como os polifenóis. Este estudo confirma que o extrato de sálvia é mais eficiente na inibição da corrosão da folha de flandres na concentração de 0,2 mg/L do que em concentrações mais elevadas. Além disso, apresenta boa inibição da folha-de-flandres em solução de cloreto de sódio a 3,0% (DENT E FUCHS-GODEC, 2021).

No estudo de Freire et al. em 2016, foi observado mudanças na polaridade do estanho em relação ao ferro durante o armazenamento, o que influencia a corrosão. Isso ocorreu devido ao contato com os ácidos orgânicos naturais do purê de cupuaçu adoçado que provavelmente quelam os íons metálicos (Fe/Sn), formando complexos que promoveram comportamentos oscilantes, onde nos primeiros 30 dias de imersão o estanho apresentou comportamento catódico, com inversão na polaridade entre 30 e 60 dias com o estanho comportando-se anodicamente em relação ao ferro e no período 60-90 outra inversão com o estanho se comportando como cátodo em relação ao aço.

A temperatura também influencia significativamente o processo corrosivo, como evidenciado no artigo *"Influence of Storage Temperature on the Corrosion Behavior of Tinplate in Citric Acid Solution"* de WANG et al. de 2019, que verificou-se que com o aumento da temperatura de armazenamento de 5°C para 37°C, a folha de flandres apresenta um potencial de corrosão mais negativo, com maior densidade de corrente de corrosão, menor potencial passivo inicial e menor potencial transpassivo em solução de ácido cítrico, como pode se observar na Figura 5.

Figura 5 - Concentração de íons Sn e Fe em solução de ácido cítrico em diferentes temperaturas.



Fonte: WANG et al. (2019)

Inicialmente a solução de ácido cítrico entra em contato direto com o revestimento de estanho, reagindo com o substrato de aço e permeando os defeitos do revestimento, gerando corrosão por codissolução de estanho e ferro em solução

de ácido cítrico, já com o tempo de imersão superior a 1 dia, o revestimento de estanho é incluindo na camada intermetálica de FeSn fora do substrato de aço que é gradualmente corroído. O substrato de aço começa a quase que totalmente a entrar em contato com a solução de ácido cítrico e assim a corrosão da folha de flandres começa a ocorrer por dissolução do substrato de aço. O estudo indica a importância de controlar a temperatura de armazenamento para minimizar a corrosão e assegurar a integridade das embalagens de alimentos ácidos (WANG et al.;2019).

2.5 Relação da influência do tempo na folha de flandres deformado

No estudo *Detection of corrosion-induced metal release from tinfoil cans using a novel electrochemical sensor and inductively coupled plasma mass spectrometer* de XIA, et al.; 2012, realizou-se um estudo a fim de identificar o metal induzido pela corrosão e liberação em bebida energéticas por meio espectrômetria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS), técnicas de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) e eletroquímica ruído (EN). Nesse estudo foram analisadas amostras cilíndricas, feitas de folha-de-flandres com o revestimento interno de epóxi fenólico, contendo bebida energética. O estudo revelou na técnica EIS que com o aumento do tempo de armazenamento, houve alterações significativas, conforme representado na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados de montagem do circuito elétrico equivalente.

Número da amostra	Tempo de armazenamento	Parâmetros de circuito equivalente eletroquímico				Coeficiente relacionado (%)
		Cc (F/cm ²)	Rc (X/cm ²)	Cdl (F/cm ²)	Rct (X/cm ²)	
s1	1 mês 3	2,383E-10	315700000	-	-	96,23
s3	meses 7	5,452E-10	48790000	-	-	93,14
s7	meses 12	8,783E-10	10080000	1,341E-07	25620000	97,56
s12	meses 27	3,09E-09	518400	4,483E-07	34670000	96,77
s27	Meses	5,117E-09	86920	6,125E-06	833200	92,16

Fonte: Adaptado de XIA, Dahai et al.(2012)

No início da exposição, o revestimento orgânico comportou-se como material dielétrico com comportamento capacitivo e na sequência sua resistência diminuiu decorrente da penetração do eletrólito por meio do revestimento orgânico. A

diminuição do R_c e o aumento do C_c indicou que o desempenho de proteção se deteriorou, e o R_{ct} diminuído e o C_{dl} aumentado indicaram que a corrosão no metal o substrato aumentou com o tempo. É importante salientar que a diminuição de R_c e R_{ct} levou à liberação de metal da folha-de-flandres. Na análise morfológica verificou-se a presença de o inchaço ou formação de bolhas no revestimento orgânico o que intensificou a liberação de metal das latas, devido ao tempo de armazenamento. Na técnica eletroquímica ruído apenas a amostra s1 apresentou bom desempenho anticorrosivo; as outras perderam desempenho em sua proteção, não atendendo aos requisitos de prazo de validade. Os resultados do ICP-MS mostraram que a liberação de estanho e ferro aumentou com o tempo de armazenamento. Foi possível concluir que após 3 meses de armazenamento a bebida energética começa a penetrar no revestimento orgânico através dos poros ou defeitos existentes nos revestimentos, de tal forma que o H^+ do ácido orgânico também passa a permear através dos poros do revestimento orgânico. Nos poros, a folha de flandres vai sendo exposta ao eletrólito. decorrente de uma atividade eletroquímica do estanho, onde ocorre a corrosão nos defeitos, devido ao metal estar muito exposto. A corrosão formada quando a reação catódica foi a redução do hidrogênio no revestimento de estanho. Os elétrons fluíram do estanho, que serviu como ânodo, para a região rica em íons de hidrogênio na superfície, que serviu como cátodo (XIA, et al.;2012).

Já o artigo "*Factors Influencing Damage on Tinplate Coatings*" de Van den Berg e Van Jaarsveld de 2022 destaca que, ao longo do tempo, a deformação pode aumentar a suscetibilidade à corrosão devido a microfissuras que se formam nos revestimentos. O envelhecimento do material constante pode exacerbar a fadiga, levando a falhas mais rápidas. A exposição prolongada a ambientes agressivos intensifica a degradação.

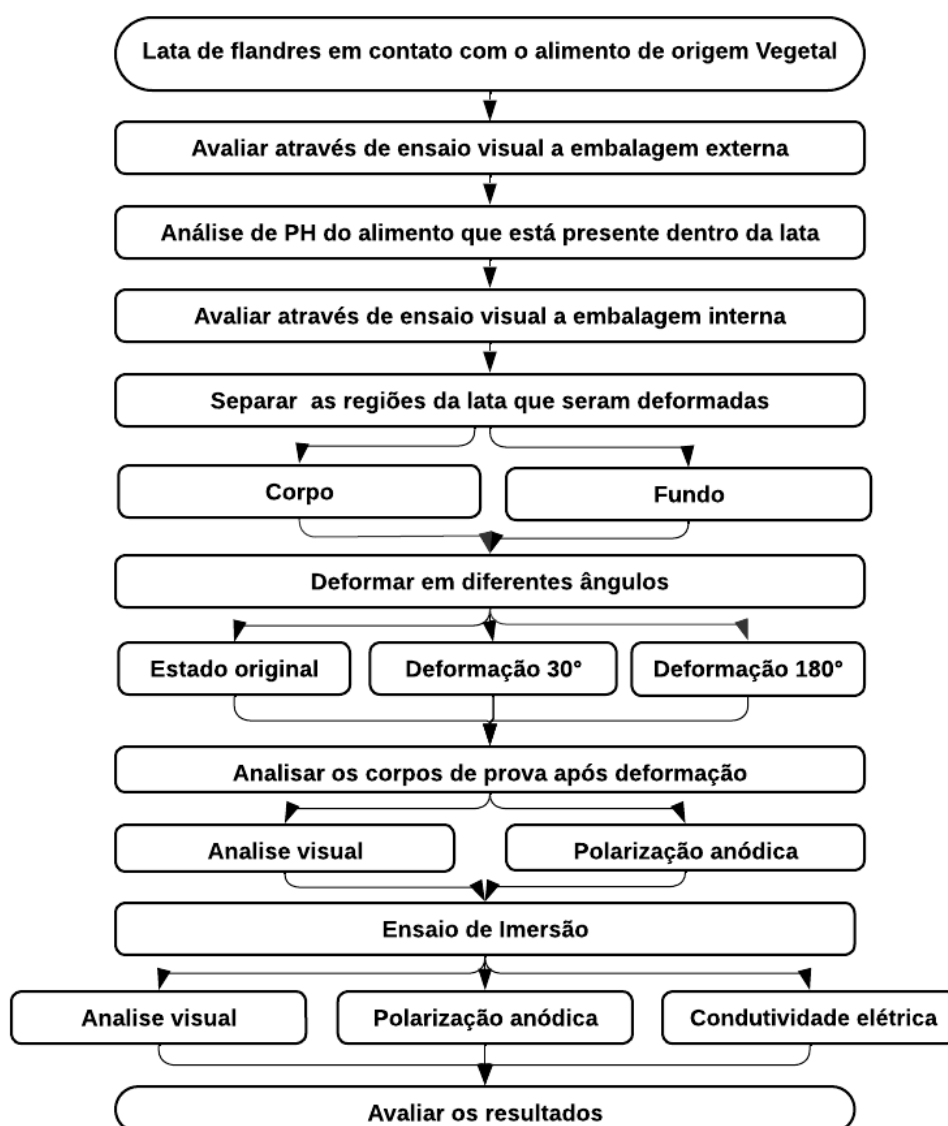
O artigo "*The Influence Study of Sulfidation Corrosion Time on the Composition of Tinplate Corrosion Products*" de Xu et al.; de 2018 investigou como o tempo de corrosão por sulfidação impacta a composição dos produtos corrosivos na folha de flandres. A pesquisa revelou que a exposição prolongada em solução de sulfeto de sódio e ácido acético (pH 6) mostrou que com o tempo, a quantidade de enxofre aumenta, enquanto o oxigênio diminui inicialmente e depois aumenta. Após 23 dias, quase não restava estanho, e o ferro representava cerca de 60% dos produtos corrosivos. O estanho apenas protege fisicamente, sem mudanças químicas

significativas. Os compostos de enxofre não mudaram, mas o enxofre de baixa valência diminuiu, enquanto o de alta valência aumentou, indicando oxidação. Este estudo mostrou a necessidade de melhorar a camada de estanho e usar substâncias redutoras pode reduzir essa corrosão.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do estudo da influência da deformação em folhas de flandres utilizadas em enlatados alimentícios. A Figura 6 demonstra as várias etapas e o fluxo a ser seguido na metodologia.

Figura 6 - Fluxograma da metodologia



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

3.1 Material

As folhas de flandres utilizadas neste estudo são compostas por uma base de aço revestida com uma camada de estanho. As amostras foram obtidas a partir de embalagens de alimentos de origem vegetal, cuja especificações incluem:

- Espessura do aço: 0,14 mm;
- Revestimento do aço: Estanhada 2,0 g/m²;
- Verniz interno: Verniz Epóxi Alumínio;
- Dimensões das amostras: 30 mm × 20 mm.

3.2 Métodos

3.2.1. Preparação das Amostras

As embalagens compostas por folha de flandres foram inicialmente medidas e cortadas utilizando tesoura mecânica de alta precisão por 30 mm × 20 mm. Em seguida, realizou-se o lixamento de aproximadamente 5 mm da região superior do corpo de prova, onde posteriormente foi efetuada a perfuração para a fixação do condutor elétrico. Após essa etapa, as amostras foram higienizadas para remoção de resíduos provenientes do corte e do lixamento.

Na sequência, um fio de cobre foi acoplado ao corpo de prova, permitindo a condução de corrente elétrica durante os ensaios. A continuidade elétrica do conjunto foi verificada por meio de multímetro, assegurando a adequada condução de corrente.

Posteriormente, foram aplicadas duas demãos de verniz incolor na região posterior do corpo de prova e em todas as bordas laterais, garantindo o recobrimento completo das áreas cortadas. O verniz também foi aplicado na região lixada, com exceção da área próxima ao furo e ao fio de cobre, a fim de manter o contato elétrico necessário para os ensaios.

Após a secagem do verniz, procedeu-se à aplicação de silicone incolor nas mesmas regiões previamente envernizadas. Diferentemente da etapa anterior, o silicone foi aplicado de modo a recobrir o furo e parte do fio de cobre, assegurando a vedação completa dessas áreas. Essa aplicação foi realizada em duas etapas, visando garantir a continuidade e a integridade da camada de proteção.

3.2.1.1 Deformação em ângulos

As amostras de embalagem compostas por folhas de flandres foram deformadas em ângulos de 0°; 30° e 180°, utilizando-se uma dobradeira manual desenvolvida especificamente para este estudo.

3.2.1.2 Dobradeira manual

Para a confecção da dobradeira manual, foram utilizados os seguintes materiais:

- 1 Bloco de madeira de pinus (35 cm × 12 cm × 4 cm);
- 1 Dobradiça de tamanho médio, conforme Figura 7.

Figura 7 - Dobradiça de tamanho médio



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

- 1 Cantoneira metálica, conforme Figura 8.

Figura 8 - Cantoneira



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

- Tinta fosca preta;
- 4 parafusos (0,35 cm × 1,2 cm), conforme Figura 9.

Figura 9 – Parafusos 0,35 cm × 1,2 cm



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

- Haste de alumínio de (15 cm × 2 cm × 0,3 cm);
- Rebite (0,4 cm × 1 cm), conforme Figura 10.

Figura 10 - Rebite



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Para a confecção da dobradeira manual, foram utilizadas as seguintes ferramentas:

- Chave de fenda;
- Rebitadeira;
- Serra policorte.

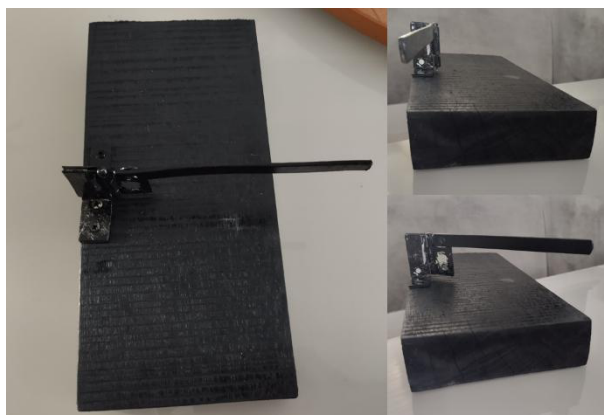
Para a confecção da dobradeira manual, foi utilizado o seguinte procedimento de montagem da dobradeira manual:

Inicialmente, a peça de madeira foi cortada nas dimensões estabelecidas (35 cm × 12 cm × 4 cm) utilizando uma serra policorte. Em seguida, realizou-se a fixação da cantoneira metálica à base por meio de dois parafusos, mantendo-se um espaçamento de 0,5 mm em relação à dobradiça. Posteriormente, a dobradiça foi

instalada na posição adequada, sendo igualmente fixada com dois parafusos. Na sequência, a haste de alumínio foi acoplada à cantoneira por meio de um rebite, aplicado com o auxílio de uma rebiteadeira.

Após a conclusão dessas etapas, a dobradeira manual (FIGURA 11) encontrava-se pronta para uso nos ensaios subsequentes; contudo, adicionou-se uma etapa final, na qual o equipamento recebeu pintura na cor preta para acabamento.

Figura 11 - Dobradeira manual



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Já com a dobradeira manual pronta as amostras de embalagem compostas por folhas de flandres foram deformadas em ângulos de 0°; 30° e 180°.

3.2.2 Avaliação visual

A avaliação visual foi conduzida na superfície externa e interna dos corpos de prova (parede das latas e fundo), com o objetivo de identificar possíveis alterações na folha metálica ao longo do período de imersão.

3.2.3. Análise de pH nas soluções dos alimentos enlatados

A determinação do pH é fundamental para a avaliação do caráter ácido ou alcalino dos fluidos presentes em alimentos enlatados, considerando que cada alimento possui uma faixa de pH específica, a qual pode influenciar diretamente o comportamento da embalagem. O pH corresponde à medida da concentração de íons hidrogênio (H^+) em uma solução, sendo expresso em uma escala que varia de 0 a 14, na qual valores mais baixos indicam maior acidez e valores mais elevados indicam maior alcalinidade.

Com o objetivo de definir a faixa de pH adotada nos ensaios de imersão, foram previamente avaliados diferentes fluidos de enlatados, de modo a representar condições reais de exposição da embalagem ao meio interno do produto.

As medições foram realizadas com um medidor de pH de bancada, modelo PH140, da marca Simpla (FIGURA 12), disponível no laboratório do campus Santo Antônio da Patrulha da Universidade Federal do Rio Grande.

Figura 12 - Medidor de pH de bancada PH140 da marca Simpla



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

3.2.4. Ensaio de imersão

O ensaio de imersão foi conduzido para simular as condições reais do contato das folhas de flandres com alimentos presentes nas latas, visando acelerar o processo corrosivo. As amostras foram imersas em soluções de ácido cítrico 0,1 mol/L com pH de 3,0 e 4,5, por períodos pré-determinados (30 minutos, 15 dias e 35 dias) para simular as diferentes durações de exposição e a influência do tempo no processo de corrosão.

3.2.5. Análise de condutividade nas soluções de imersão

A análise de condutividade elétrica da solução de imersão é uma ferramenta importante para o monitoramento do comportamento corrosivo das folhas de flandres

durante os ensaios experimentais, uma vez que reflete a concentração de íons dissolvidos no meio, possibilitando identificar se a íons metálicos decorrentes dos processos de corrosão do material presentes na solução de imersão. A condutividade da solução depende da concentração e mobilidade dos íons nela presentes, sendo que o aumento de íons metálicos eleva a capacidade do meio em conduzir corrente elétrica.

A condutividade elétrica das soluções foi medida utilizando um condutivímetro de bancada, modelo W12D, da marca Bel (FIGURA 13), com resultados expressos em milisiemens por centímetro (mS/cm). O condutivímetro está disponível no laboratório do campus Santo Antônio da Patrulha da Universidade Federal do Rio Grande.

Figura 13 - Condutivímetro de bancada W12D da marca Bel



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

3.2.6. Análise de polarização anódica

A polarização anódica foi empregada para analisar o comportamento da folha de flandres sob condições de oxidação, por meio do deslocamento do potencial do eletrodo de trabalho para valores mais positivos em relação ao potencial de corrosão. Esta análise possibilita avaliar a eficiência da camada de estanho e do revestimento interno na proteção, bem como identificar alterações no comportamento eletroquímico decorrentes de deformações mecânicas, que podem provocar descontinuidades no

revestimento e a consequente exposição do substrato metálico ao meio corrosivo. Além disso, a análise das curvas de polarização permite quantificar a influência do pH da solução, do tempo de imersão e do grau de deformação na intensificação dos processos corrosivos.

Os ensaios eletroquímicos foram realizados utilizando-se um potenciostato modelo PGSTAT302N, da marca Metrohm Autolab, em célula eletroquímica convencional de três eletrodos, conforme Figura 14. As amostras de folha de flandres foram empregadas como eletrodo de trabalho (WE) com área exposta de 2,3 cm²; o eletrodo de calomelano saturado foi utilizado como eletrodo de referência (RE); e o eletrodo de platina foi utilizado como contra eletrodo (CE). Todos os experimentos foram conduzidos no laboratório do campus Santo Antônio da Patrulha da Universidade Federal do Rio Grande.

Figura 14 - Potenciostato PGSTAT302N, da marca Metrohm Autolab



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Após um período inicial de estabilização de 30 minutos em potencial de circuito aberto, adotou-se como estimativa do potencial de corrosão (E_{corr}), as curvas de polarização potenciodinâmica foram obtidas em solução de ácido cítrico 0,1 mol/L, utilizando-se uma taxa de varredura de 0,001 V/s. A partir do potencial de circuito aberto, aplicaram-se polarizações progressivas nos sentidos anódico e catódico, registrando-se o gráfico de potencial em função do logaritmo da densidade de corrente.

A densidade de corrente de corrosão (i_{corr}) foi determinada pelo método de extrapolação de Tafel. Nas extremidades das curvas obtidas, identificaram-se regiões com comportamento aproximadamente linear, correspondentes às regiões controladas pela cinética de ativação das reações eletroquímicas. Nesses trechos, ajustaram-se retas para a determinação das inclinações de Tafel anódica (β_a) e catódica (β_c). As retas foram extrapoladas até o potencial de corrosão (E_{corr}), sendo o ponto de interseção das extrapolações anódica e catódica associado à condição de sobretensão nula, correspondente ao estado de equilíbrio natural do sistema corrosivo. A densidade de corrente correspondente a esse ponto foi considerada como a densidade de corrente de corrosão (i_{corr}).

Matematicamente, a extrapolação baseia-se nas Equações 1 e 2:

- Ramo anódico:

$$\eta_a = \beta_a \log \left(\frac{i}{i_{corr}} \right) \quad (1)$$

- Ramo catódico:

$$\eta_c = -\beta_c \log \left(\frac{i}{i_{corr}} \right) \quad (2)$$

onde:

η = sobretensão (V), definida como $E - E_{corr}$;

E = potencial aplicado (V);

E_{corr} = potencial de corrosão (V);

i = densidade de corrente (A/cm²);

i_{corr} = densidade de corrente de corrosão (A/cm²);

β_a = inclinação de Tafel anódica (V/dec);

β_c = inclinação de Tafel catódica (V/dec).

O valor de i que satisfaz simultaneamente as duas expressões é o i_{corr} .

Os valores de i_{corr} obtidos foram posteriormente convertidos em taxa de corrosão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Avaliação dos valores de pH de soluções de alimentos enlatados

Foram avaliados os valores de pH das soluções presentes em diferentes alimentos enlatados, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Medições de pH das soluções contidas em produtos enlatados

Medições de pH	
Soluções contidas nos produtos enlatados	pH
Doce de Figo	5,63
Doce de Abacaxi	3,75
Doce de Pêssego	3,41
Ervilha e cenoura	5,88
Ervilha e milho	5,37
Extrato de Tomate	5,15
Jardineira	6
Salsicha	6
Sardinha com óleo	5,54
Sardinha com molho de tomate	5,43

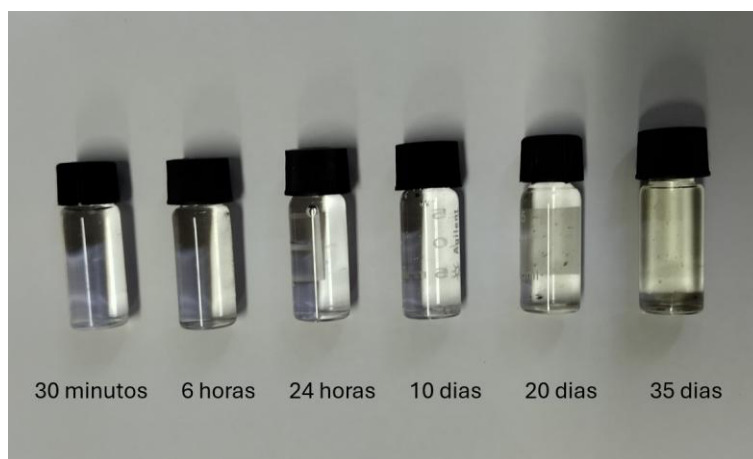
Fonte: Autora (2025)

Os resultados obtidos possibilitaram a delimitação das faixas de pH empregadas no presente estudo, bem como a identificação dos alimentos que se enquadram dentro dos intervalos de pH estabelecidos.

4.2 Avaliação visual da coloração do meio de imersão ao longo do tempo

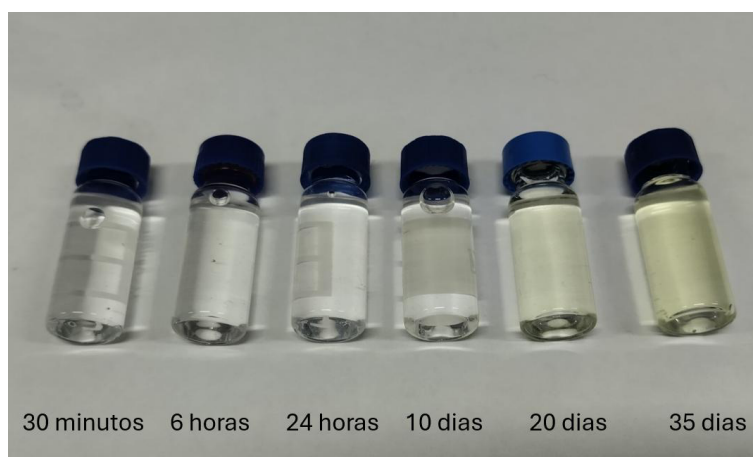
Ao longo dos 35 dias de imersão das amostras em solução de ácido cítrico, verificou-se que tanto os corpos de prova expostos ao meio com pH 3,0 quanto aqueles imersos em solução com pH 4,5 apresentaram progressivo aparecimento de coloração amarelada no meio líquido, conforme Figura 15 e 16.

Figura 15 - Amostras de soluções de corpos provas com pH 3,0 coletas em diferentes períodos



Fonte: Autora (2025)

Figura 16 – Amostras de soluções de corpos provas com pH 4,5 coletas em diferentes períodos



Fonte: Autora (2025)

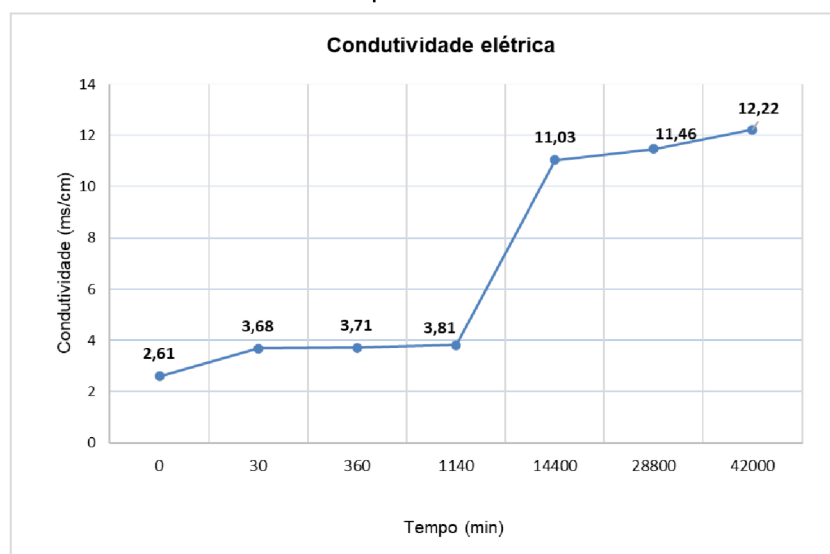
Em ambas as condições experimentais (pH 3,0 e pH 4,5), observou-se o início a alteração da tonalidade da cor da solução a partir do 20º dia de imersão, indicando o avanço do processo de migração de constituintes solúveis do revestimento de verniz.

Esse comportamento é explicado pelos autores PASEIRO-CERRATO, DEVRIES e BEGLEY (2017) que explicam que revestimentos internos à base de resina epóxi apresentam potencial significativo de migração de componentes para o meio, os autores verificaram que, quando expostos a simulantes alimentares ácidos, os revestimentos epoxídicos liberaram monômeros, oligômeros e produtos de reação da matriz polimérica já nos primeiros dias de contato (10 dias). Além disso, observaram que o simulante apresentou coloração amarelada perceptível, fenômeno atribuído à presença de compostos migrantes com atividade cromófora oriundos da degradação ou cura incompleta da resina epóxi. Essa evidência experimental confirma que substâncias provenientes de revestimentos epoxídicos podem não apenas migrar em quantidades detectáveis, mas também conferir alteração de cor ao meio em contato.

4.3 Avaliação da condutividade elétrica do meio de imersão ao longo do tempo

Ao longo dos 35 dias foi analisado a condutividade elétrica das soluções, onde o Gráfico 1, começa com condutividade em 2,61 mS/cm, leve aumento até 3,81 mS/cm, seguido por um pico abrupto e muito elevado em 11,03 mS/cm (14 400 min) e depois o comportamento do gráfico de manteve.

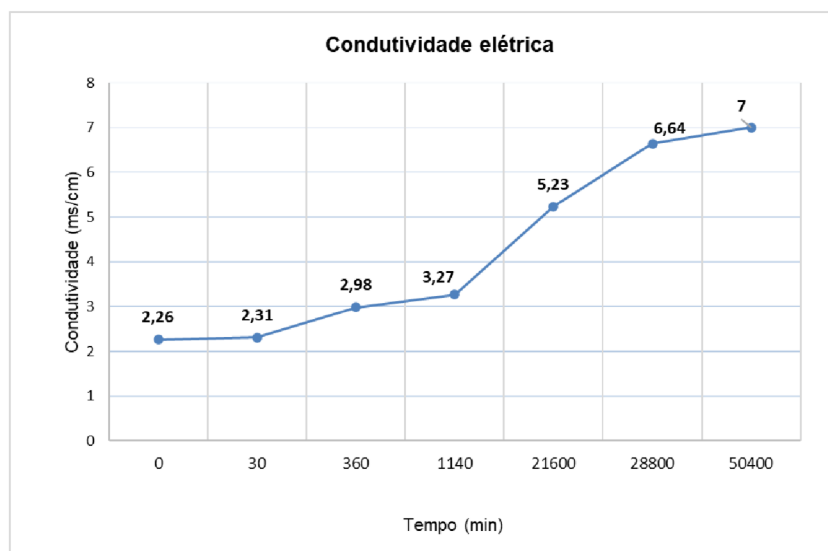
Gráfico 1 – Condutividade elétrica de soluções com pH 3,0 coletas em diferentes períodos



Fonte: Autora (2025)

Já o Gráfico 2, inicia em condutividade mais baixa (2,26 mS/cm), obtendo um resultado crescente onde tem um aumento mais acentuado entre 1.140 e 28.800 minutos.

Gráfico 2 – Condutividade elétrica de soluções com pH 4,5 coletas em diferentes períodos



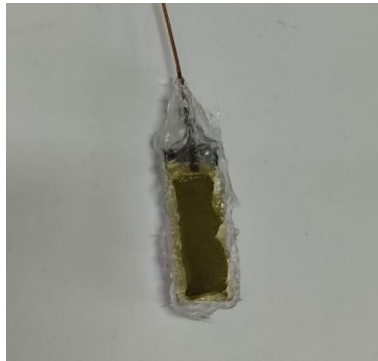
Fonte: Autora (2025)

Os gráficos 1 e 2 mostram um aumento na concentração de ferro na solução de imersão durante os períodos analisados. Felipe (2008) explica que esse aumento evidencia a degradação das propriedades protetivas do revestimento polimérico, o que favorece a ocorrência de processos corrosivos ao longo do tempo e, consequentemente, a contaminação metálica do produto.

4.4 Análise visual dos corpos de prova ao longo do tempo

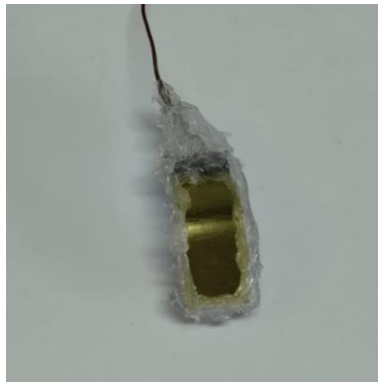
A análise visual da superfície interna das latas foi realizada em corpos de prova sem deformação e com deformações de 30° e 180°. As amostras foram imersas em solução por períodos de 30 minutos, 15 dias e 35 dias, com o objetivo de monitorar possíveis alterações decorrentes da interação entre a lata e o meio, as quais podem comprometer a integridade da embalagem.

Figura 17 - Corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 3,0) com deformação de 0°, após 30 minutos



Fonte: Autora (2025)

Figura 18 - Corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 3,0) com deformação de 30°, após 30 minutos



Fonte: Autora (2025)

Figura 19 - Corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 3,0) com deformação de 180°, após 30 minutos



Fonte: Autora (2025)

Figura 20- Corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 3,0) com deformação de 0°, após 15 dias



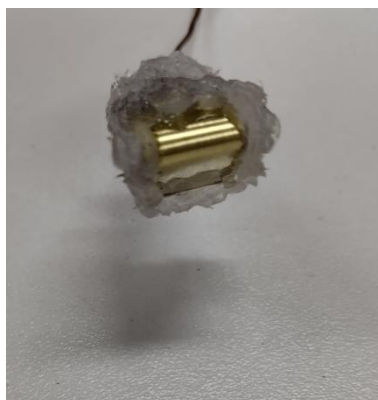
Fonte: Autora (2025)

Figura 21- Corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 3,0) com deformação de 30°, após 15 dias



Fonte: Autora (2025)

Figura 22- Corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 3,0) com deformação de 180°, após 15 dias



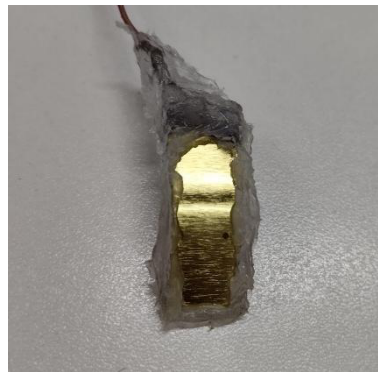
Fonte: Autora (2025)

Figura 23- Corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 3,0) com deformação de 0°, após 35 dias



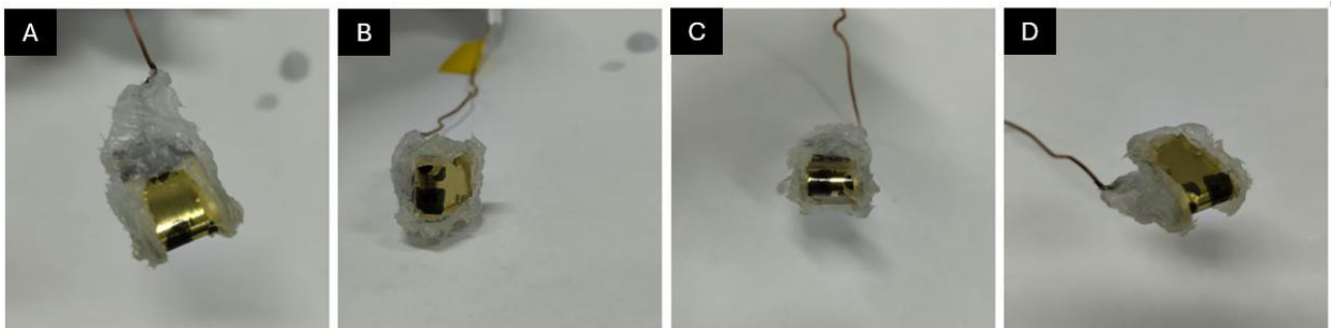
Fonte: Autora (2025)

Figura 24- Corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 3,0) com deformação de 30°, após 35 dias



Fonte: Autora (2025)

Figura 25 - Corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 3,0) com deformação de 180°, após 35 dias: (A) região frontal; (B) região lateral; (C) região posterior; e (D) vista oblíqua.



Fonte: Autora (2025)

Figura 26- Corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 4,5) com deformação de 0°, após 30 minutos



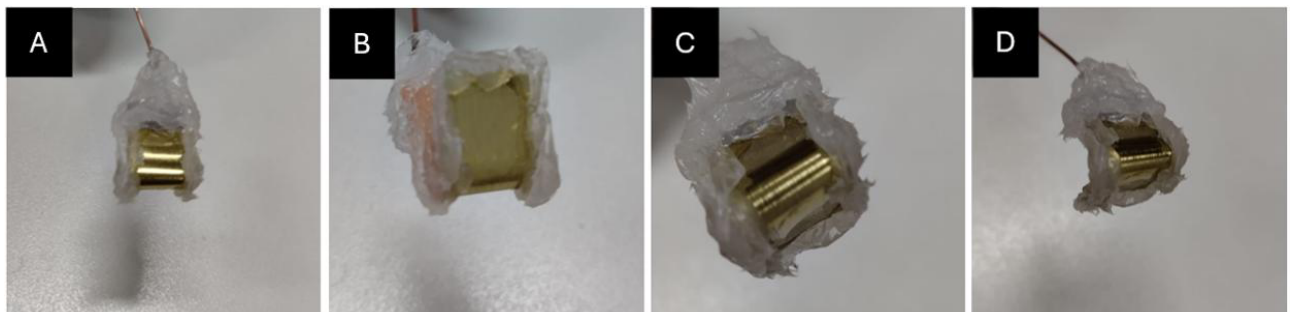
Fonte: Autora (2025)

Figura 27 - Corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 4,5) com deformação de 30°, após 30 minutos



Fonte: Autora (2025)

Figura 28 - Corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 4,5) com deformação de 180°, após 30 minutos: (A) região frontal; (B) região posterior; (C) região do meio da dobra; e (D) vista oblíqua



Fonte: Autora (2025)

Figura 29 - Corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 4,5) com deformação de 0°, após 15 dias.



Fonte: Autora (2025)

Figura 30 - Corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 4,5) com deformação de 30°, após 15 dias.



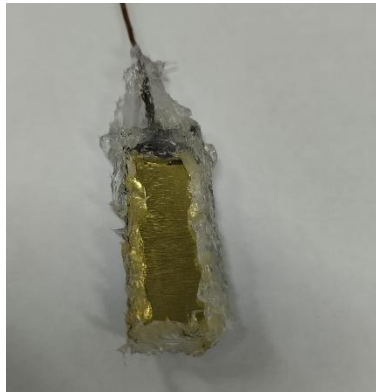
Fonte: Autora (2025)

Figura 31 - Corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 4,5) com deformação de 180°, após 15 dias.



Fonte: Autora (2025)

Figura 32 - Corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 4,5) com deformação de 0°, após 35 dias.



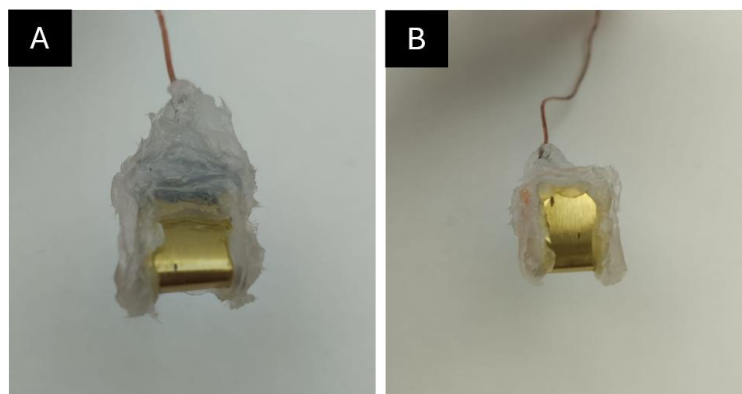
Fonte: Autora (2025)

Figura 33 - Corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 4,5) com deformação de 30°, após 35 dias.



Fonte: Autora (2025)

Figura 34 - Corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 4,5) com deformação de 180°, após 35 dias: (A) Região frontal do corpo de prova; (B) Região posterior do corpo de prova.



Fonte: Autora (2025)

As Figuras 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 26, 27, 28 e 31 não apresentaram manchas em suas superfícies, indicando ausência de alterações visuais associadas à degradação do revestimento no período avaliado.

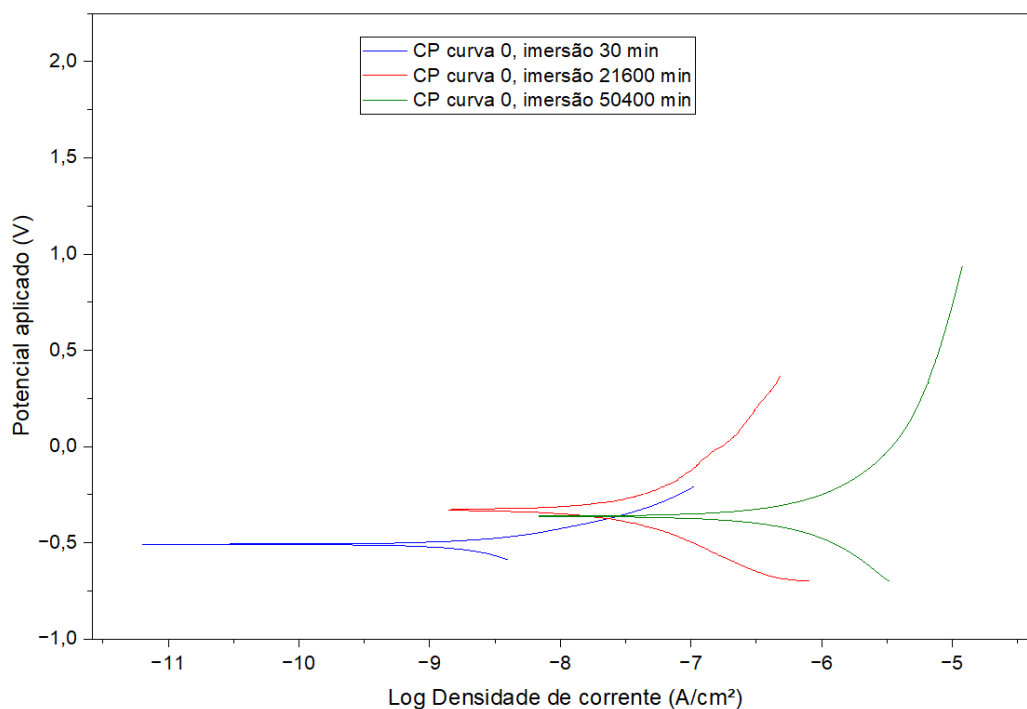
Por outro lado, as manchas escuras observadas no revestimento interno do corpo da lata, conforme ilustrado nas Figuras 24, 29, 30, 32, 33 e 34, são compatíveis com o início de um processo corrosivo, característico de situações em que ocorre a exposição do estanho ao meio agressivo, neste caso, a solução de ácido cítrico. Resultados semelhantes foram reportados por Vargas, da Silva e Rodrigues (2015), que observaram o aparecimento de manchas escuras e degradação do revestimento em amostras de flandres submetidas a meios ácidos. Segundo os autores, esse comportamento está associado ao ataque químico do meio ácido ao verniz, especialmente em condições de baixo pH, como no caso do ácido presente no abacaxi, o qual compromete a integridade do revestimento e acelera o processo corrosivo.

Na Figura 25, observa-se a formação de uma mancha escura de maior extensão, evidenciando degradação mais severa do revestimento na região da deformação. Esse comportamento indica a ocorrência de falha localizada do verniz, permitindo o contato direto do eletrólito com o estanho, o que favorece a intensificação do processo corrosivo. De acordo com Robertson (2016), deformações mecânicas em embalagens metálicas revestidas podem comprometer a continuidade do verniz, favorecendo o contato do meio corrosivo com o substrato metálico e, conseqüentemente, a corrosão localizada.

4.5 Polarização

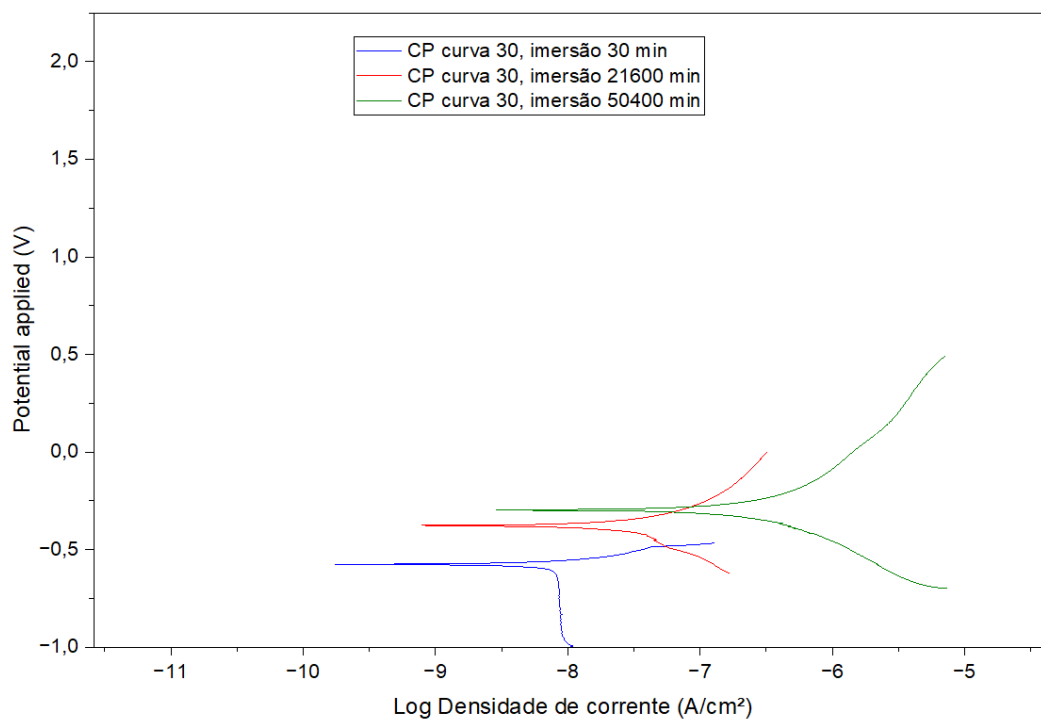
Foram realizadas análises de polarização anódica em corpos de prova com diferentes graus de deformação, submetidos a imersão em solução de ácido cítrico com pH 3,0 e pH 4,5, com tempos de exposição de 30 minutos, 15 dias e 35 dias. Os resultados obtidos podem ser observados nos Gráficos 3 a 8.

Gráfico 3 – Curvas de polarização anódica do corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 3,0) com deformação de 0°.



Fonte: Autora (2025)

Gráfico 4 – Curvas de polarização anódica do corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 3,0) com deformação de 30°.



Fonte: Autora (2025)

Gráfico 5 – Curvas de polarização anódica do corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 3,0) com deformação de 180°.

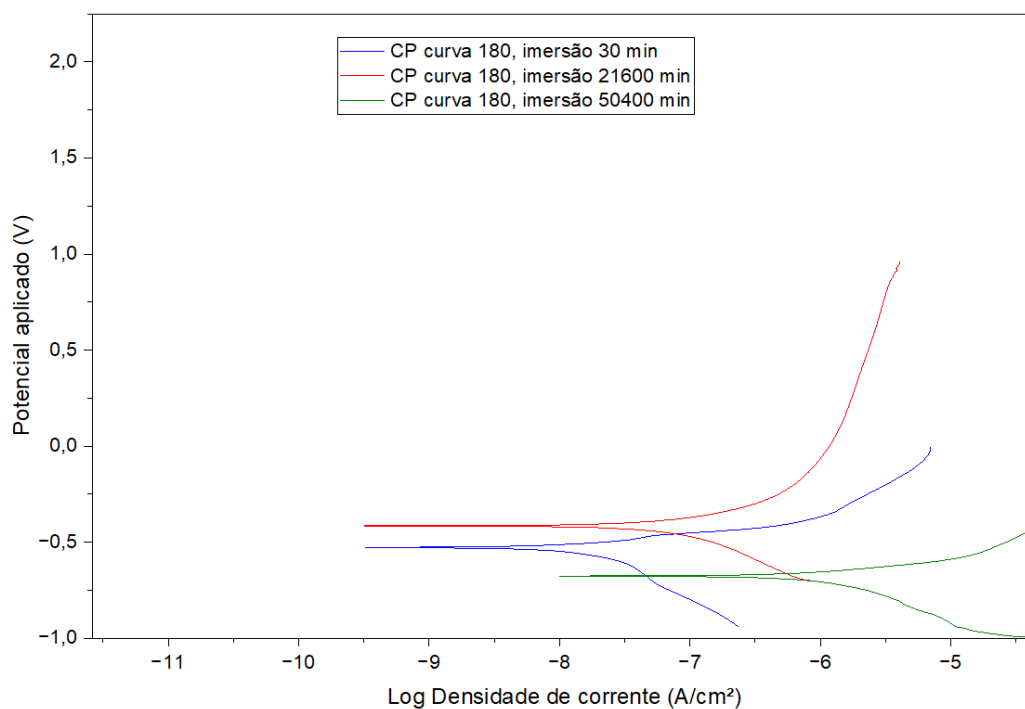


Gráfico 6 – Curvas de polarização anódica do corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 4,5) com deformação de 0°.

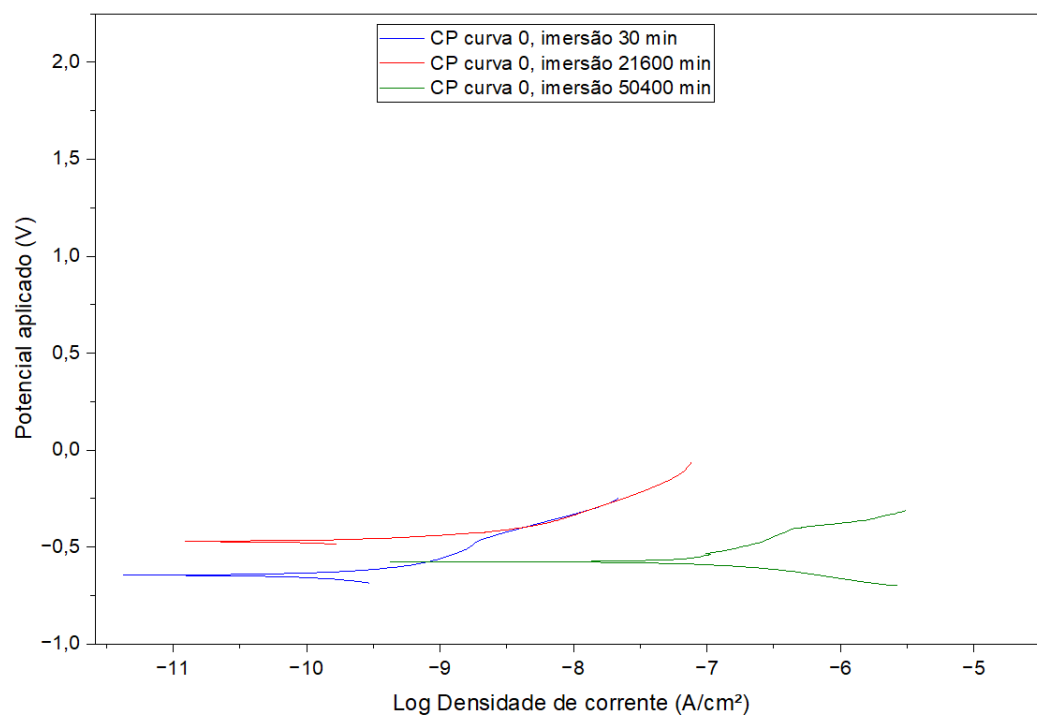


Gráfico 7 – Curvas de polarização anódica do corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 4,5) com deformação de 30

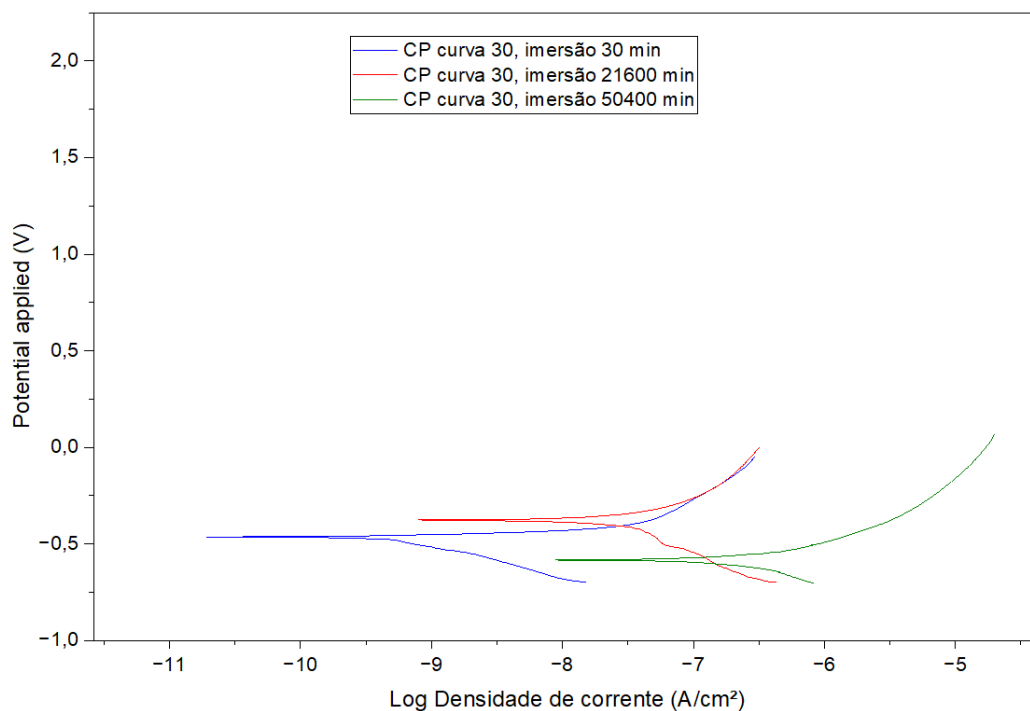
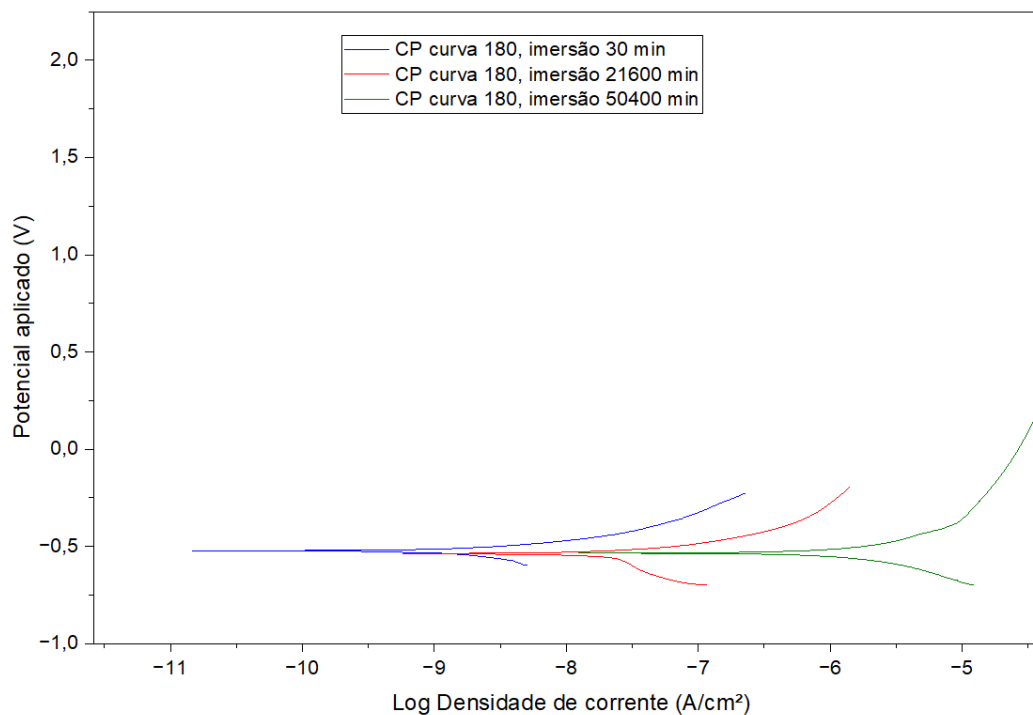


Gráfico 8 – Curvas de polarização anódica do corpo de prova imerso em solução de ácido cítrico (pH 4,5) com deformação de 180°.



Os valores de densidade de corrente de corrosão (i_{corr}) calculados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros experimentais e densidade de corrente de corrosão (i_{corr}) dos corpos de prova de folha de flandres.

Ângulo da deformação	Tempo de imersão (min)	pH da solução	i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
0°	30	3	0,00316
0°	21600	3	0,0316
0°	50400	3	0,316
30°	30	3	0,01
30°	21600	3	0,0316
30°	50400	3	0,316
180°	30	3	0,036
180°	21600	3	0,1
180°	50400	3	3,162
0°	30	4,5	0,0001
0°	21600	4,5	0,000316
0°	50400	4,5	0,1
30°	30	4,5	0,00316
30°	21600	4,5	0,0316
30°	50400	4,5	0,316
180°	30	4,5	0,00316
180°	21600	4,5	0,0316
180°	50400	4,5	3,162

Fonte: Autora (2025)

4.5.1 Influência do pH do meio eletrolítico

As curvas de polarização anódica das amostras de folha de flandres, apresentadas nos Gráficos 3, 4 e 5, evidenciam que o aumento do tempo de imersão

em solução de ácido cítrico 0,1 mol/L promove deslocamento progressivo das curvas para maiores densidades de corrente. Esse comportamento indica a intensificação dos processos de dissolução metálica e é acompanhado pelo aumento da densidade de corrente de corrosão (i_{corr}), refletindo a degradação gradual da camada de verniz e do revestimento de estanho, bem como a redução de sua eficiência como barreira protetora.

Em soluções com pH 3,0, observa-se comportamento anódico mais ativo, caracterizado por elevação mais acentuada da densidade de corrente, especialmente nas amostras submetidas a maiores graus de deformação. Esse efeito é evidenciado no Gráfico 5, correspondente à deformação de 180°, no qual a i_{corr} aumenta de 0,0316 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ após 30 minutos de imersão para 3,162 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ após 35 dias, indicando o estabelecimento e a intensificação do processo corrosivo. Esse comportamento está em concordância com a literatura, que aponta a redução do pH como fator determinante para a instabilidade do estanho em meios orgânicos ácidos, em razão do aumento da solubilidade dos produtos de corrosão e da aceleração das reações anódicas (FONTANA, 1986; GOUDA 1981).

Em comparação, as curvas obtidas em solução com pH 4,5, representadas pelos Gráficos 6, 7 e 8, apresentam menores densidades de corrente anódica para tempos equivalentes de imersão, indicando menor agressividade do meio eletrolítico. Contudo, mesmo nessa condição, observa-se que o aumento do tempo de exposição resulta em intensificação progressiva da atividade anódica, especialmente após 35 dias de imersão. Esse comportamento pode ser observado no Gráfico 8, correspondente à deformação de 180°, no qual o i_{corr} evolui de 0,00316 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ após 30 minutos para 3,162 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ após 35 dias. Esses resultados indicam que, embora a redução da acidez do meio atue como fator atenuante da corrosão, ela não é suficiente para impedir a degradação eletroquímica da folha de flandres ao longo do tempo, conforme descrito por Morgan (2016), que destaca que meios menos ácidos tendem a retardar, mas não eliminar, os processos corrosivos em embalagens metálicas destinadas ao contato com alimentos.

4.5.2 Influência do ângulo de deformação na densidade de corrente

A análise das curvas de polarização anódica obtidas para os diferentes ângulos

de deformação (0°, 30° e 180°) demonstra que o aumento do grau de deformação promove elevação da densidade de corrente no ramo anódico. Observa-se que as amostras deformadas a 30° e 180° apresentam deslocamento das curvas para regiões de maiores densidades de corrente em comparação às amostras sem deformação, indicando aumento da densidade de corrente de corrosão (i_{corr}). Os maiores valores de i_{corr} foram associados aos maiores ângulos de deformação, sendo de 0,316 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ para as amostras deformadas a 30° e de 3,162 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ para aquelas deformadas a 180°. Em materiais revestidos, como a folha de flandres, a deformação mecânica é reconhecida como fator crítico para a ruptura local da camada protetora, favorecendo a exposição do substrato de aço e a intensificação da corrosão (RITZENTHALER; PELLETIER, 1998).

4.5.3 Influência do tempo de imersão

O tempo de imersão em solução de ácido cítrico 0,1 mol/L¹ exerce influência significativa sobre o comportamento eletroquímico das amostras deformadas. Observa-se, nos Gráficos 3, 4, 5, 6, 7 e 8, um aumento progressivo da densidade de corrente no ramo anódico à medida que o tempo de exposição é ampliado, refletindo a elevação da densidade de corrente de corrosão (i_{corr}). Esse comportamento indica a intensificação dos processos de dissolução metálica ao longo do tempo, associada à degradação gradual da camada de estanho. De acordo com a literatura, a exposição prolongada a meios ácidos favorece a deterioração contínua do revestimento protetor, promovendo a transição de um regime inicialmente controlado pelo revestimento para um comportamento de corrosão ativa do substrato metálico (WOLYNEC, 2003).

5 CONCLUSÕES

O presente estudo permitiu avaliar de forma sistemática a influência da deformação mecânica, do pH do meio e do tempo de exposição no comportamento corrosivo de folhas de flandres utilizadas em embalagens para alimentos de origem vegetal, com foco na integridade do revestimento interno e na migração de constituintes metálicos e poliméricos para o meio.

Os ensaios de imersão em solução de ácido cítrico demonstraram que, independentemente do pH avaliado (3,0 e 4,5), ocorreu alteração progressiva da coloração do meio a partir do 20º dia de exposição, indicando a migração de componentes solúveis do revestimento orgânico. Esse fenômeno foi atribuído à degradação do verniz epoxídico interno, colaborando com os resultados da literatura que apontam a suscetibilidade desses revestimentos à liberação de monômeros, oligômeros e subprodutos de cura quando expostos a meios ácidos, sinalizando possível comprometimento da função barreira do revestimento ao longo do tempo.

A análise da condutividade elétrica das soluções de imersão evidenciou aumento significativo ao longo do período experimental, especialmente em meio mais ácido (pH 3,0), indicando elevação da concentração de ions dissolvidos. Esse comportamento está diretamente associado à degradação progressiva das propriedades protetivas do sistema estanho/verniz e à intensificação dos processos corrosivos, favorecendo a liberação de ferro para o meio. Tais resultados confirmam que a condutividade elétrica constitui um parâmetro sensível para o monitoramento da evolução da corrosão em sistemas embalagem de alimento.

A avaliação visual dos corpos de prova mostrou que amostras sem deformação ou submetidas a baixos tempos de exposição não apresentaram alterações superficiais relevantes. Entretanto, em amostras deformadas, especialmente àquelas com ângulo de 180º e submetidas a maiores tempos de imersão, foram observadas manchas escuras no revestimento interno, indicativas do início de corrosão localizada. Esses resultados demonstram que a deformação mecânica atua como fator crítico na ruptura do verniz, favorecendo o contato direto do meio agressivo com o estanho e, conseqüentemente, a intensificação do processo corrosivo.

As análises de polarização anódica confirmaram a influência significativa do pH, do grau de deformação e do tempo de imersão sobre o comportamento

eletroquímico da folha de flandres. Observou-se que meios mais ácidos promovem maior atividade anódica e maiores densidades de corrente de corrosão, especialmente em amostras submetidas a deformações mais severas. Além disso, o aumento do tempo de exposição resultou em elevação progressiva da densidade de corrente de corrosão, evidenciando a degradação gradual da camada protetora e a transição para um regime de corrosão ativa do substrato metálico.

Com base nos resultados obtidos neste estudo, conclui-se que a deformação mecânica, associada a meios ácidos e a longos períodos de armazenamento, compromete significativamente a eficiência do sistema de proteção da folha de flandres, favorecendo a corrosão interna e a migração de constituintes metálicos e orgânicos. Esse estudo reforça a importância do controle rigoroso dos processos de escolha adequada dos revestimentos internos e das condições de armazenamento, visando garantir a segurança alimentar, a qualidade do produto enlatado e a conformidade com os requisitos regulatórios.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como continuidade deste estudo, recomenda-se a ampliação da investigação por meio da avaliação da migração quantitativa de estanho e ferro para o meio, utilizando técnicas analíticas complementares, sugere-se a inclusão de diferentes simulantes alimentares, representativos de variados tipos de alimentos enlatados (ácidos, pouco ácidos, neutros e contendo sais), bem como a avaliação do efeito da temperatura de armazenamento, visando aproximar ainda mais as condições experimentais da realidade.

Também se propõe a realização de estudos comparativos envolvendo diferentes sistemas de revestimentos orgânicos internos. A integração de análises morfológicas e químicas de superfície, por meio de técnicas como microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por energia dispersiva (EDS), pode contribuir para uma compreensão mais detalhada dos mecanismos de falha do revestimento e do processo corrosivo.

7 REFERÊNCIAS

7.1 Referências nominais

ÁLVAREZ, D., COLLAZO, A., NÓVOA, X. R., & PÉREZ, C. **Electrochemical behavior of organic/inorganic films applied on tinplate in different aggressive media**. Progress in Organic Coatings, Percent: 93%. v. 77, n. 12, p. 2066-2075, 2014.

AUGUSTO, Pedro Esteves Duarte. **Princípios de tecnologia de alimentos**. 1. ed. São Paulo: Atheneu, 2017. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 24 mar. 2024.

ARMSTRONG, R. D.; WRIGHT, J. D. **Impedance studies of poly ethylmethacrylate coatings formed upon tin-free steel**. Corrosion science, Percent: 92%. v. 33, n. 10, p. 1529-1539, 1992.

BUCULEI, A. et al. **Metals migration between product and metallic package in canned meat**. LWT – Food Science and Technology, Percent: 96%. v. 59, n. 2, p. 645–651, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.06.003>>. Acesso: 10 dez. 2025

BARÃO, M. Z. **Embalagens para produtos alimentícios**. Instituto de Tecnologia do Paraná – TECPAR. 10/8/2011. 26 p. SBRT. Disponível em: <<http://www.respostatecnica.org.br/dossie-tecnico/downloadsDT/NTY0MQ==>>. Acesso: 03 dez. 2023

BESSARAB, O. V.; PLATONOVA, T. F.; PROTUNKEVITCH, I. V. **A study of the properties of metal packaging materials using model corrosive media**. International Journal of Corrosion and Scale Inhibition, Percent: 77%. v. 9, n. 3, p. 912-928, 2020.

CAMPBELL-PLATT, Geoffrey. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**. Editora Manole,

2015. E-book. ISBN 9788520448458. Disponível em:
<<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788520448458/>>. Acesso em: 06 dez. 2023.

DENT, Maja; FUCHS-GODEC, Regina. **Sage Extract as a Natural Source of Corrosion Inhibitor for Tinplate in 3.0% NaCl**. Food technology and biotechnology, Percent: 65%. v. 59, n. 4, p. 413-421, 2021.

DESHWAL, G. K. et al. **A review on metal packaging: materials, forms, food applications and future trends**. Journal of Food Science and Technology, Percent: 86%. v. 56, n. 5, p. 1–14, 2019. Disponível em:
<<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7270472/>>. Acesso em: 10 dez. 2025.

European Standard EN 10202:2001. **Cold reduced tin mill products-electrolytic tinplate and electrolytic chromium/Cr oxide coated steel**. The European Standard Publications, Brussels.2001

FELIPE, Augusta Maria Paulain Ferreira. **Estudo da interação produto embalagem em folha-de-flandres aplicada à polpa de cupuaçu (Theobroma grandiflorum)**. 2008. Tese de Doutorado. Tese de Doutorado–Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP, 74 p.

FERNANDES, Célia Andressa Leite Lopes P.; TEIXEIRA, Eliana M.; TSUZUKI, Natália. **Produção Agroindustrial - Noções de Processos, Tecnologias de Fabricação de Alimentos de Origem Animal e Vegetal e Gestão Industrial**. Editora Saraiva, 2015. E-book. ISBN 9788536532547. Disponível em:
<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536532547/>. Acesso em: 06 dez. 2023.

FONTANA, M. G. **Corrosion engineering**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1986.

FREIRE, Maria Teresa de Alvarenga et al. **Food-packaging interaction on the**

stability of canned sweetened cupuaçu (*Theobroma grandiflorum* Schum) puree. Revista Caatinga, Percent: 54%. v. 29, n. 4, p. 1006-1014, 2016.

GOUDA, V. K. et al. **Corrosion behaviour in organic acid solutions—I. Tin electrode.** Corrosion Science, Percent: 94%. v. 21, n. 1, p. 1-15, 1981.

HILL, R. **On discontinuous plastic states with special reference to localized necking in thin sheets**, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Percent: 92%. v1, 19-30, 1952.

IVANOV, V.P., PILIPENKO, S.V., SHTEMPEL, O.P., VIGERINA, T.V. **Irregularity of microhardness and microstructure of low-carbon steel rolled in a two-stand rolling-leveling mill.** Frontier Materials and Technologies, Percent: 14%. v2, pp. 35–45 . 2023.

JORGE, Neuza. **Embalagens para alimentos.** São Paulo: Cultura Acadêmica, p. 20, 2013.

KASSOUF, A.; CHEBIB, H.; LEBBOS, N.; OUAINI, R. **Migration of iron, lead, cadmium and tin from tinplate-coated cans into chickpeas.** Food Additives & Contaminants: Part B, Percent: 68%v. 6, n. 4, p. 298–304, 2013. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24059695/>>. Acesso em: 10 dez. 2025

MANNHEIM, Chaim; PASSY, Nehama; BRODY, Aaron L. **Internal corrosion and shelf-life of food cans and methods of evaluation.** CRC critical reviews in food science and nutrition, Percent: 99%. v. 17, n. 4, p. 371-407, 1982.

MARCINIAK, Z. **Sheet metal forming limits.** In: Mechanics of Sheet Metal Forming: Material Behavior and Deformation Analysis. Boston, MA: Springer US, 1978. p. 215-235.

MELVIN, C; JEWELL, E; MIEDEMA, J; ALLMAN, A; MCMURRAY, N. **Identifying interlayer surface adhesion failure mechanisms in tinplate packaging steels.**

Packaging Technology and Science, Percent: 72%. v. 32, n. 7, p. 345-355, 2019.

MONTANARI, Angela; ZURLINI, Chiara. **Influence of side stripe on the corrosion of unlacquered tinplate cans for food preserves**. Packaging Technology and Science, Percent: 72%. v. 31, n. 1, p. 15-25, 2018.

MORGAN, E. **Tinplate & Modern Canmaking Technology**. Elsevier, 2016.

PATRICK, G. W. **Internal corrosion of tinplate food containers**. Anti-Corrosion Methods and Materials, Percent: 46% v. 23, n. 6, p. 9-11, 1976.

PASEIRO-CERRATO, Rafael; DEVRIES, Jonathan; BEGLEY, Timothy H. **Evaluation of short-term and long-term migration testing from can coatings into food simulants: Epoxy and acrylic-phenolic coatings**. Journal of agricultural and food chemistry, Percent: 94%. v. 65, n. 12, p. 2594-2602, 2017.

RITZENTHALER, S.; PELLETIER, H. **Influence of plastic deformation on corrosion of coated steels**. Surface and Coatings Technology, Percent: 85%. v. 105, p. 155–161, 1998.

ROBERTSON, Gordon L. **Food Packaging: Principles and Practice**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2016

SILVA, P. **Produção e características das folhas-de-flandres**. CSN. Usina Presidente Vargas, Volta Redonda, RJ, 1969

SPIŠÁK, E; DŽUPON, M; MAJERNÍKOVÁ, J; DUĽOVÁ, E.S. **Failure of coatings of tinplates**. Acta Metallurgica Slovaca, Percent: 53 %. v. 21, n. 3, p. 213-219, 2015.

SPIŠÁK, E; MAJERNÍKOVÁ, J; DUĽOVÁ SPIŠÁKOVÁ, E; KAŠČÁK, Ľ. **Analysis of plastic deformation of double reduced sheets**. Acta mechanica et automatica, Percent: 53 %. v. 10, n. 4, p. 271-274, 2016.

SWIFT, H W. **Plastic instability under plane stress**. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Percent: 92 %. v1, 1-18. 1952.

TEIXEIRA, V. B.; PEREIRA, N. M. B. **Estudo do desempenho de embalagens metálicas sob deformação e efeito na migração de ferro e estanho**. Revista Acadêmica Oswaldo Cruz, n. 16, 2016. Disponível em: <https://www.oswaldocruz.br/revista_academica/content/pdf/Edicao_16_PEREIRA_Natally_M_B_TEIXEIRA_Vict%C3%B3ria_B.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2025.

TWEDE, Diana. **Materiais para embalagens**. Editora Blucher, 2010. E-book. ISBN 9788521215585. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521215585/>>. Acesso em: 04 dez. 2023.

VAN DEN BERG, M; VAN JAARSVELD, H. **Factors influencing damage on Tinplate coatings**. Conference on packaging, IAPRI Bangkok 2022, pp. 393–401 2022.

VARGAS, B. S.; DA SILVA, S. N. **Avaliação morfológica da conservação de embalagens metálicas para alimentos em conserva**. 2015. Disponível em: <[20150930223319000000.pdf](https://www.repositorio.ufpa.br/bitstream/handle/2011-6/10000000/20150930223319000000.pdf)>. Acesso em: 01 jan. 2025.

XIA, D; SONG, S; GONG, W; JIANG, Y; GAO, Z; WANG, J. **Detection of corrosion-induced metal release from tinplate cans using a novel electrochemical sensor and inductively coupled plasma mass spectrometer**. Journal of food engineering, Percent: 94 %.v. 113, n. 1, p. 11-18, 2012.

XU, Fei-Fan; SHENG, Hai; SHI, Yun-Guang; YANG, Jian-Wei. **The influence study of sulfidation corrosion time on the composition of tinplate corrosion products**. Yejin Fenxi/Análise Metalúrgica. , Percent: 23 %. v 38, p. 7 -11.2018

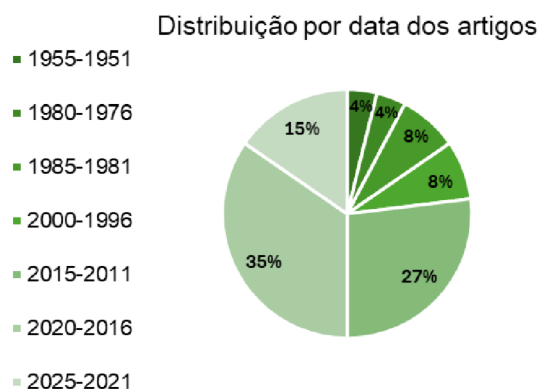
YILDIRIM, Koray; KIZILKAYA, Ali Can. **Effect of the combination of organic acid**

solutions on tinplate corrosion. Materials Chemistry and Physics, Percent: 88%. v. 291, p. 126742, 2022.

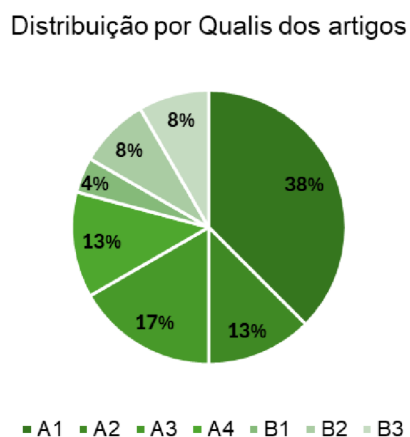
WANG, J; ZHANG, L; GAO, Y; LIU, X; HU, W. **Influence of Storage Temperature on the Corrosion Behavior of Tinplate in Citric Acid Solution.** International Journal of Electrochemical Science, Percent: 32%. v. 14, n. 1, p. 59-74, 2019.

WOLYNEC, S. **Técnicas eletroquímicas em corrosão.** São Paulo: Edusp, 2003.

7.2 Referências por data



7.3 Referências por Qualis



7.4 Referências por estrado

