



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

MARIA EDUARDA BEZERRA DE MELO SOUZA

**DELAMINAÇÃO DO VEDANTE EM ROLHAS METÁLICAS NA INDÚSTRIA DE
ALIMENTOS: UM ESTUDO DE CASO**

RECIFE

2025

MARIA EDUARDA BEZERRA DE MELO SOUZA

**DELAMINAÇÃO DO VEDANTE EM ROLHAS METÁLICAS NA INDÚSTRIA DE
ALIMENTOS: UM ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia de Materiais da Universidade
Federal de Pernambuco, como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Materiais.

Orientador (a): Dayanne Diniz de Souza

Recife

2025

MARIA EDUARDA BEZERRA DE MELO SOUZA

**DELAMINAÇÃO DO VEDANTE EM ROLHAS METÁLICAS NA INDÚSTRIA DE
ALIMENTOS: UM ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia de Materiais da Universidade
Federal de Pernambuco, como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Materiais.

Aprovado em: 19/12/2025..

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dayanne Diniz de Souza (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Edval Gonçalves de Araújo (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

MSc. Jonathan Torquato (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Souza, Maria Eduarda Bezerra de Melo .

Delaminação do Vedante em Rolhas Metálicas na Indústria de Alimentos:
Um Estudo de Caso / Maria Eduarda Bezerra de Melo Souza. - Recife, 2025.
48p. : il., tab.

Orientador(a): Dayanne Diniz de Souza

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Materiais -
Bacharelado, 2025.

Inclui referências.

1. Rolhas metálicas. 2. PVC-Free. 3. Adesão. 4. BADGE. 5. Set-off. I.
Souza, Dayanne Diniz de. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

Dedico este trabalho à minha mãe, Inês, que debaixo de muito sol trabalhou incansavelmente para que eu pudesse seguir por caminhos de sombra, protegida por tudo aquilo que ela abriu mão para me oferecer. Tudo o que sou e tudo o que alcancei carrega a marca da sua coragem, do seu amor e de uma dedicação que transcende palavras.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, antes de tudo, a Deus, pela força silenciosa que me sustentou nos dias difíceis, pela luz que guiou cada escolha e pela serenidade que me manteve firme quando o caminho parecia incerto. Sem Sua presença, este trabalho não seria possível.

Agradeço à minha família pelo apoio constante, pela compreensão nos momentos de ausência e pela força que sempre me ofereceram.

Ao meu namorado, João Pedro, cuja dedicação ultrapassou qualquer expectativa. Esteve presente nas noites após longas horas de aula e nas madrugadas antes do trabalho, sempre disposto a ajustar seus próprios caminhos aos meus. Nos momentos mais difíceis, quando o cansaço pesava ou a dúvida insistia, encontrei nele um amparo sereno e constante.

As minhas amigas pessoais: Beatriz, Helena, Júlia, Letícia e Carol, por enviarem sempre as melhores energias, compartilharem dúvidas, desafios e também tantos momentos de emoção que tornaram essa caminhada mais leve. Agradeço pelo constante incentivo e pela cumplicidade sincera.

A Indústria Renda, por uma experiência sólida, que reforça minha identidade como futura Engenheira de Materiais e me prepara para os próximos desafios profissionais, com mais maturidade, conhecimento e propósito, em especial aos meus amigos e Engenheiros: Guilherme Leão, Ubiratan Oliveira e Cleber Bonetti.

A minha equipe de trabalho, que sempre trouxe leveza e alegria para os meus dias, em especial ao meu gestor e amigo Adilson, que se dedicou ao meu aprendizado profissional e confiou em mim desde o meu estágio, me entregando desafios e acreditando sempre na minha capacidade de superá-los.

A minha orientadora Prof. Dr^a Dayanne Diniz por sua disponibilidade e seu apoio neste trabalho.

A Universidade Federal de Pernambuco, que me ofereceu uma base sólida para o desenvolvimento acadêmico e pessoal e me mostrou o valor de uma educação pública, gratuita, plural e de qualidade.

RESUMO

A indústria de embalagens metálicas enfrenta constantes desafios relacionados à garantia da hermeticidade e segurança de alimentos, sendo a falha de aderência do vedante em rolhas metálicas um problema crítico de qualidade. O presente trabalho teve como objetivo investigar as causas da delaminação do vedante *free* (isento de PVC) em rolhas metálicas do tipo *pry-off*, através de um estudo de caso comparativo entre matérias-primas conformes e não conformes realizado em uma indústria de alimentos do Estado de Pernambuco. A metodologia adotou uma abordagem com o emprego de algumas técnicas de caracterização e ensaios nas rolhas metálicas, utilizando Microscopia Óptica e Confocal para análise topográfica, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) acoplada à Espectroscopia de Energia Dispersiva (MEV/EDS) para caracterização morfológica e elementar, e Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massas (GC-MS) para investigação molecular orgânica. As análises morfológicas indicaram diferenças na textura superficial, porém insuficientes para explicar a falha isoladamente. A análise por EDS não detectou contaminação inorgânica significativa. Contudo, a análise via GC-MS revelou a presença de Bisfenol A Diglicidil Éter (BADGE) na superfície das amostras não conformes. Considera-se então, que o mecanismo de falha decorre do fenômeno de migração *set-off*, impulsionado pelo empilhamento prolongado e pressão nos fardos durante a logística de importação, o que pode ter transferido constituintes do verniz externo para a face interna da folha. Essa contaminação formou uma camada de baixa energia superficial, impedindo a ancoragem química e mecânica do sistema de vedação PVC-*free*.

Palavras-chave: Rolhas metálicas. PVC-*free*. Adesão. BADGE. *Set-off*.

ABSTRACT

The metal packaging industry faces constant challenges related to ensuring the hermeticity and safety of food, with sealant adhesion failure in metal stoppers being a critical quality problem. This study aimed to investigate the causes of delamination of PVC-free sealant in pry-off metal stoppers through a comparative case study between compliant and non-compliant raw materials conducted in a food industry in the state of Pernambuco. The methodology employed several characterization and testing techniques on the metal stoppers, using Optical and Confocal Microscopy for topographic analysis, Scanning Electron Microscopy (SEM) coupled with Energy Dispersive Spectroscopy (SEM/EDS) for morphological and elemental characterization, and Gas Chromatography coupled with Mass Spectrometry (GC-MS) for organic molecular investigation. Morphological analyses indicated differences in surface texture, but these were insufficient to explain the failure in isolation. EDS analysis did not detect significant inorganic contamination. However, GC-MS analysis revealed the presence of Bisphenol A Diglycidyl Ether (BADGE) on the surface of the non-conforming samples. It is therefore considered that the failure mechanism stems from the set-off migration phenomenon, driven by prolonged stacking and pressure on the bales during import logistics, which may have transferred constituents from the outer varnish to the inner face of the sheet. This contamination formed a low-energy surface layer, preventing the chemical and mechanical anchoring of the PVC-free sealing system.

Keywords: Crown corks. PVC-free. Adhesion. Badge. Set-off.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Exemplo de rolhas metálicas	6
Figura 2	Estrutura química do Policloreto de Vinila (PVC)	9
Figura 3	Estrutura química do Polietileno (PE)	10
Figura 4	Folha de aço empilhada	11
Figura 5	Folha de aço litografada	12
Figura 6	Princípio do processo de estampagem de rolhas metálicas	13
Figura 7	Processo de aplicação de vedante	13
Figura 8	Tampa com falha de aderência	15
Figura 9	Amostras das folhas metálicas: (a) RIV e (b) RNV....	21
Figura 10	Microscópio Óptico Observer Zm1	21
Figura 11	Microscópio Eletrônico de Varredura modelo INSPECT S50	22
Figura 12	Espectrômetro de Massas TQ-8040 Shimadzu	23
Figura 13	Microscópio Confocal LSM 700	24
Figura 14	Micrografias óticas e mapas topográficos das amostras	26
Figura 15	Comparação entre as substâncias identificadas nas amostras	28
Figura 16	Representação do mecanismo de falha por contaminação de BADGE	30

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 –	Condições instrumentais e parâmetros operacionais do ensaio de GC-MS	23
Quadro 2 –	Resultados de EDS (% em massa) para a superfície da amostra conforme (RNV)	26
Quadro 3 –	Resultados de EDS (% em massa) para a superfície da amostra não conforme (RIV)	26

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BADGE	Bisfenol A Diglicidil Éter
COVs	Compostos Orgânicos Voláteis
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy (Espectroscopia de Energia Dispersiva)
GC-MS	Gas Chromatography–Mass Spectrometry (Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massas)
ISO	International Organization for Standardization
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
PE	Polietileno
PP	Polipropileno
PVC	Policloreto de vinila
RI	Amostra não conforme (Folha virgem)
RIV	Amostra não conforme com verniz
RN	Amostra conforme (Folha virgem)
RNV	Amostra conforme com verniz
UV	Ultravioleta
WBL	Weak Boundary Layer (Camada Limite Fraca)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Objetivos.....	3
1.1.1	Objetivo geral.....	3
1.1.2	Objetivos específicos.....	3
1.2	Justificativa.....	4
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	5
2.1	Embalagem metálica para bebidas.....	5
2.2	Rolhas metálicas.....	6
2.3	Matérias-primas e componentes envolvidos.....	7
2.3.1	Vernizes internos utilizados.....	8
2.3.2	Vedantes.....	9
2.4	Descrição geral do processo de fabricação.....	10
2.5	Problemas técnicos e não conformidades no processo.....	13
2.5.1	Migração e contaminação set-off.....	13
2.5.2	Falha de aderência do vedante.....	14
2.5.3	Impactos dessa falha na qualidade do produto final.....	15
2.6	Métodos de caracterização.....	15
2.6.1	Microscopia Eletrônica de Varredura e EDS (MEV/EDS).....	15
2.6.2	Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massa (GC-MS).....	16
2.6.3	Microscopia Confocal.....	17
2.6.4	Microscopia Óptica.....	17
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	18
3.1	Microscopia Óptica.....	19
3.2	MEV/EDS.....	20
3.3	GC-MS.....	21

3.4	Microscopia Confocal.....	22
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
4.1	Avaliação da morfologia das folhas.....	23
4.2	Espectroscopia EDS.....	25
4.3	Cromatografia Gasosa (GC-MS).....	26
5	CONCLUSÕES.....	29
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	32

1 INTRODUÇÃO

A indústria de embalagens é um setor estratégico na cadeia de bens de consumo, fornecendo soluções duráveis e com excelentes qualidades de preservação para os produtos. Nesse sentido, os materiais metálicos são amplamente utilizados devido às suas notáveis propriedades de barreira, sendo vastamente aplicados na indústria de embalagens de alimentos (ROBERTSON, 2013). Estas embalagens, que incluem latas, tampas, rolhas e outros componentes metálicos, são amplamente utilizadas em produtos destinados a conservas, laticínios, bebidas e molhos, devido à sua resistência à contaminação externa, longa vida útil e potencial de reciclabilidade (DESHWAL et al., 2020).

No segmento de bebidas, as rolhas metálicas têm se destacado pela eficiência na vedação hermética, contribuindo para a preservação do sabor, da carbonatação e da qualidade do produto. Além disso, as rolhas também podem receber uma impressão gráfica de alta qualidade, o que agrega valor estético e informativo à embalagem. Estas características tornam as rolhas metálicas especialmente adequadas para o envase de bebidas, principalmente no fechamento de frascos de vidro em produtos como líquidos alcoólicos, refrigerantes, leite de coco e azeite de dendê (ABRALATAS, 2023).

Nas últimas décadas, o envase de bebidas teve avanços tecnológicos significativos, tanto no desenvolvimento de novos materiais quanto na modernização dos processos de produção. No entanto, apesar de todos os progressos, ainda há desafios relevantes na produção de rolhas metálicas, sobretudo no que se refere à qualidade, à ocorrência de falhas funcionais e às inconsistências nos parâmetros críticos de processo. Estes fatores impactam diretamente a eficiência da vedação e a segurança do produto final, exigindo investimentos contínuos em controle de qualidade e inovação tecnológica (DESHWAL et al., 2020).

A produção de tampas metálicas requer rigoroso controle de qualidade em etapas como envernizamento, litografia, estampagem e aplicação de vedantes. Por exemplo, o envernizamento das chapas cromadas previne a corrosão e assegura a aderência dos revestimentos (PETER & ULRICH, 2007). Após a impressão gráfica via litografia, a chapa é cortada e moldada, e um vedante adequado deve ser aplicado internamente para garantir a vedação e proteção contra agentes externos

(ROBERTSON, 2013). Entre os principais modelos de rolhas metálicas, destacam-se as rolhas pry-off, que exigem o uso de abridor, e as twist-off, que permitem a abertura manual. Além da funcionalidade, essas rolhas diferenciam-se tecnicamente em aspectos como o tipo de verniz, a formulação do vedante e o torque de fechamento, o que impõe exigências específicas ao processo produtivo (SACMI, 2025).

Entre as principais dificuldades identificadas no processo produtivo dessas tampas, destaca-se a falha na aderência do vedante, o que compromete a vedação do produto. Essas falhas geram consequências como retrabalho, perda de matéria-prima, não conformidades em auditorias e insatisfação dos clientes. Além disso, representam um risco potencial à segurança da saúde do consumidor, já que falhas na vedação podem permitir a entrada de microrganismos, comprometendo a estabilidade e a integridade do conteúdo (ROBERTSON, 2013). A identificação dessas causas, aliada a uma análise crítica dos pontos de falha no processo, é fundamental para promover a melhoria contínua e assegurar a competitividade da empresa no mercado.

Nesse contexto, desenvolveu-se um estudo de caso em uma indústria de embalagens para alimentos situada no estado de Pernambuco, com o propósito de investigar os mecanismos responsáveis pela delaminação do vedante em rolhas metálicas. O estudo se concentrou na análise técnica comparativa entre lotes com histórico de falha (não conformes) e materiais de referência (conformes), abordando uma problemática real dessa indústria que impacta diretamente a hermeticidade do produto e a segurança alimentar.

A estratégia metodológica adotada se baseou nas caracterizações e análises da avaliação física das rolhas metálicas. Para isso, foram empregadas principalmente técnicas de Microscopia Óptica (MO) e Microscopia Confocal para a análise topográfica, Microscopia Eletrônica de Varredura acoplada à Espectroscopia de Raios X por Dispersão de Energia (MEV/EDS) para avaliação morfológica e elementar, e Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massas (GC-MS). Esse conjunto de técnicas visou identificar alterações superficiais e a presença de contaminantes orgânicos na matéria-prima, permitindo o diagnóstico preciso da causa raiz.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo geral

Analisar o problema de adesão do vedante no processo de fabricação de rolhas metálicas em uma indústria de Pernambuco, visando à melhoria da qualidade da produção e à conformidade dessas rolhas com os padrões dos processos críticos.

1.1.2. Objetivos específicos

- Realizar uma investigação comparativa entre amostras de folhas metálicas de diferentes fornecedores, aplicando uma sequência sistemática de análises laboratoriais;
- Caracterizar a topografia e a morfologia superficial do substrato metálico através de microscopia confocal e microscopia ótica, visando verificar a influência da rugosidade na ancoragem mecânica do verniz;
- Identificar a presença de contaminantes orgânicos e inorgânicos na interface de adesão, utilizando técnicas espectroscópicas (EDS) e cromatográficas (GC-MS), visando detectar a presença de agentes inibidores de aderência;
- Correlacionar o processo logístico e de armazenamento das matérias-primas com os fenômenos de migração química identificados nas análises laboratoriais;
- Contribuir para a conformidade das rolhas metálicas com as normas e padrões técnicos aplicáveis, considerando os requisitos de segurança de alimentos e desempenho, visando fortalecer a competitividade e a adequação do produto ao mercado.

1.2. JUSTIFICATIVA

As embalagens metálicas cumprem um papel fundamental na cadeia produtiva de bebidas, atuando como elementos estratégicos de proteção, conservação e comunicação com o consumidor. Sua função primordial é garantir que o produto chegue ao consumidor em condições ideais, preservando suas características sensoriais e físico-químicas ao longo de todo o ciclo de vida (PACK GATE, 2025).

O uso de rolhas metálicas é importante para garantir a vedação, segurança e integridade de bebidas e alimentos. Além disso, a aderência dos vernizes aplicados nessas tampas está diretamente relacionada à qualidade da superfície metálica e ao controle térmico do processo, o que torna a fabricação altamente sensível a variações operacionais (PETER & ULRICH, 2007). Essas exigências reforçam a necessidade de atenção rigorosa aos parâmetros técnicos envolvidos em cada etapa produtiva.

No entanto, apesar da relevância desses fatores para a segurança de alimentos, observa-se uma carência de estudos e publicações técnicas aprofundadas sobre as não conformidades recorrentes no processo de fabricação dessas embalagens. Essa lacuna evidencia a importância do presente estudo, que busca contribuir com uma abordagem prática e aplicada para a identificação e solução de problemas reais enfrentados pela indústria.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Embalagem metálica para bebidas

O uso de metais em embalagens, tais como aço e alumínio, possuem um conjunto de propriedades interessantes como: a elevada resistência mecânica, que garante proteção contra deformações, impactos e variações de pressão durante o transporte e o armazenamento. Além disso, o aço possui boa conformabilidade, permitindo processos de estampagem e moldagem complexos, e alta compatibilidade com revestimentos internos, assegurando a inércia química e a segurança no contato com alimentos e bebidas (DESHWALI & PANJAGARI, 2019).

No Brasil, a reciclabilidade desses materiais tem sido expressiva. As latas de alumínio para bebidas atingiram uma taxa de reciclagem de 98,7% em 2022, mantendo o país como referência mundial nesse setor (ABRALATAS, 2023). O aço, por sua vez, apresenta uma taxa média nacional de reciclagem superior a 47%, sendo amplamente reaproveitado na fabricação de novas embalagens e produtos industriais (AÇOS BRASIL, 2022). Essa elevada capacidade de reaproveitamento contribui para a sustentabilidade do setor, reduzindo o consumo de recursos naturais, os custos de produção e os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida das embalagens metálicas.

No setor de bebidas, destacam-se 2 tipos de embalagens: as latas de alumínio e as rolhas metálicas. Cada material possui suas características e suas vantagens. As latas de alumínio são leves e versáteis e atuam bloqueando a luz e o ar, para cumprir com o papel da conservação dos alimentos e bebidas. Paralelamente a isso, as rolhas metálicas, combinam a força do aço com a proteção do estanho e agindo como barreira à oxidação e à contaminação (ABRALATAS, 2023).

2.2. Rolhas metálicas

As rolhas metálicas têm um papel específico dentro do conjunto de embalagens metálicas, pois são utilizadas como vedação em garrafas de vidro, atuando como barreira eficiente contra oxigênio e outras contaminações, garantindo

assim a integridade físico-química da bebida até o momento do consumo. São compostas por aço revestido com vernizes e elementos de vedação compatíveis. A Figura 1 ilustra rolhas metálicas produzidas para a indústria de alimentos (bebidas).

Figura 1 - Exemplo de rolha metálicas



Fonte: Autor, 2025

As rolhas metálicas são predominantemente utilizadas em bebidas carbonatadas e não carbonatadas, como cervejas e aguardente e produtos gordurosos como leite de coco e azeite de dendê. Uma vez que oferecem vedação hermética, o que é crucial para bebidas carbonatadas e evitam a liberação de dióxido de carbono, preservando a pressão interna da garrafa (SACMI, 2025). Além disso, quando comparadas às rolhas de cortiça tradicionais, as rolhas metálicas oferecem facilidade de abertura, consistência de vedação, e acabamento metálico que permite a impressão de logotipos e cores.

Nesse contexto, as rolhas metálicas podem ser de dois tipos: *pry-off* ou *twist off*. As rolhas *pry-off*, também conhecidas como tampas “coroa tradicional”. Apesar de visualmente idênticas, a coroa tradicional exige o uso de um abridor para ser retirada da garrafa, enquanto a *twist off* é projetada para abertura manual, sem a necessidade de abridor, possuindo ranhuras internas que se encaixam em roscas presentes no gargalo da garrafa e facilitando para que o consumidor abra o recipiente através da torção (SANTOS; PEREIRA, 2023). Ambas cumprem a função de vedação e preservação da bebida, mas diferem principalmente no método de abertura, nível de conveniência e indicação de uso de acordo com o perfil do produto.

2.3. Matérias-primas e componentes envolvidos

Para a fabricação de rolhas, há necessidade de outros componentes além do aço, como o vedante e o verniz de aderência, que muda de acordo com o vedante utilizado.

O aço utilizado na fabricação das rolhas metálicas é em formato de folha cromada, e sua espessura varia entre 0,18mm e 0,22mm. Provenientes de distintas fontes de fornecimento, essas folhas são recepcionadas acondicionadas em fardos, tendo sido submetidas a uma extensa cadeia logística de transporte e movimentação. Antes de serem expedidas, essas chapas são submetidas pelo fabricante por alguns tratamentos para garantir uma superfície lisa e sem porosidades, o que é essencial tanto para a durabilidade do fechamento quanto para a aderência de revestimentos e das tintas. O revestimento de cromo proporciona resistência à corrosão e compatibilidade com contato alimentar (PETER; ULRICH, 2007). Um aspecto técnico relevante é que dependendo da origem de fabricação, mais especificamente do fabricante, as folhas já são fornecidas com o revestimento de verniz aplicado na face externa.

Paralelamente a isto, as tintas e vernizes aplicados nas tampas metálicas desempenham funções distintas conforme o lado do material. Na parte externa são aplicadas as tintas, feitas com resinas resistentes à abrasão, garantindo a aparência visual e reforçando a identidade da marca. Já na estrutura interna, utiliza-se um verniz de aderência que juntamente com o vedante formará uma barreira química entre o metal e o líquido contido na garrafa.

Os vernizes são revestimentos finos que, ao serem aplicados sobre superfícies metálicas, formam um filme protetor contínuo após a secagem. Sua função principal é proteger o material subjacente contra corrosão, agentes químicos e desgaste mecânico, além de conferir propriedades estéticas e atuar como barreira a gases ou líquidos (CALLISTER; RETHWISCH, 2020).

2.3.1. Vernizes internos utilizados

Formados por uma mistura de resinas, solventes, pigmentos e aditivos, os vernizes são desenvolvidos para secar e constituir um filme protetor. Sua função inclui evitar a migração de metais ou odores indesejáveis e, fundamentalmente,

estabelecer uma adesão rígida ao vedante (*liner*) (PETER; ULRICH, 2007). Atualmente, são utilizados dois tipos de vernizes internos em tampas metálicas: *laca-free* e *organosol*.

O verniz *laca-free* é um revestimento polimérico livre de compostos orgânicos voláteis (COVs), formulado para minimizar impactos ambientais e atender a requisitos de segurança de alimentos. Ele atua formando uma camada resistente à migração de substâncias indesejáveis, e é compatível com produtos sensíveis. Além disso, o *laca-free* é ideal para vedantes do tipo *free*, ou seja, selantes formulados com polímeros alternativos ao PVC (policloreto de vinila), como elastômeros à base de polietileno ou polipropileno.

Já o verniz *organosol* é um revestimento mais flexível que o *laca-free* e altamente resistente à ação química de líquidos ácidos ou alcoólicos, formando um filme protetor capaz de se deformar sem quebrar, garantindo integridade em situações de manipulação mecânica, como o fechamento e abertura manual de garrafas (PETER; ULRICH, 2007). Além disso, este verniz é compatível com selantes do tipo *twist*, utilizados principalmente em bebidas carbonatadas que exigem resistência mecânica durante a abertura manual. Essa associação é crucial para evitar falhas de vedação e garantir durabilidade e segurança do produto.

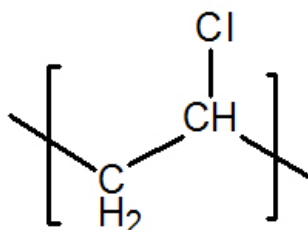
2.3.2. Vedantes

Os vedantes são compostos poliméricos aplicados no interior das rolhas metálicas, entre a tampa de metal já envernizada e o gargalo de vidro, com a função de assegurar uma vedação hermética e barreira contra oxigênio, gases e micro-organismos. Tradicionalmente, os selantes baseados em PVC (policloreto de vinila) eram amplamente utilizados devido à sua facilidade de moldagem e vedação eficaz, porém, hoje já há outros tipos de vedantes feitos à base de polietileno (PE) ou polipropileno (PP).

O Policloreto de Vinila (PVC) é um polímero termoplástico obtido pela polimerização do monômero cloreto de vinila, visto na Figura 2, amplamente utilizado na indústria de embalagens devido à sua versatilidade, boa resistência química, flexibilidade e capacidade de formar barreiras contra gases e umidade

(CALLISTER, 2012), propriedades esperadas para garantir a vedação eficiente em embalagens.

Figura 2 - Policloreto de vinila

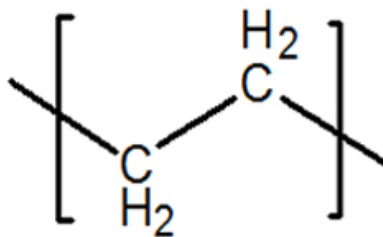


Fonte: Conselho Regional de Química (2011).

Uma das aplicações específicas do PVC na indústria de rolhas metálicas é na formulação do vedante *twist*, caracterizado por sua alta elasticidade, resiliência mecânica e capacidade de suportar múltiplas aberturas e fechamentos sem perda significativa de desempenho. Essa variação do selante é feita para atuar em conjunto com o verniz *organosol*, proporcionando vedação hermética para bebidas gaseificadas, uma vez que ele mantém a pressão interna da embalagem e evita a liberação de dióxido de carbono (SACMI, 2025)..

Em contrapartida ao modelo tradicional baseado em PVC, os selantes do tipo *free* surgem como alternativa mais sustentável e alinhada às regulamentações internacionais que restringem o uso de halogenados em embalagens para contato com alimentos (DESHWAL et al., 2020). Esses vedantes são formulados à base de polietileno (PE), conforme visto na Figura 3, que conferem ao material baixa toxicidade, elevada inércia química e boa processabilidade térmica, sendo ideais para tampas metálicas destinadas a mercados mais exigentes (CALLISTER & RETHWISCH, 2020). Além disso, esses materiais apresentam excelente adesão ao verniz *laca-free*, garantindo a integridade da vedação mesmo após o envase a quente ou exposição a ciclos térmicos (PETER & ULRICH, 2007).

Figura 3 - Polietileno



Fonte: Conselho Regional de Química (2011).

2.4. Descrição geral do processo de fabricação

O processo de produção é composto por etapas sequenciais que asseguram a qualidade, funcionalidade e segurança do produto final, iniciando com a aquisição dos insumos base: folhas de aço, vernizes, tintas e vedantes, e dos outros materiais de embalagem secundários, como sacos e caixas.

A gestão da matéria-prima envolve uma cadeia de suprimentos diversificada, com insumos provenientes de múltiplos fornecedores e distintas localidades geográficas, o que frequentemente submete o material a extensos ciclos logísticos de transporte. Para garantir a integridade e otimizar a movimentação, as folhas metálicas, o principal insumo utilizado na produção, são recepcionadas na unidade fabril acondicionadas em fardos compactos, contendo aproximadamente 1.200 unidades empilhadas, o que totaliza uma massa média de 1.300Kg de folha por *pallet*, conforme a Figura 4.

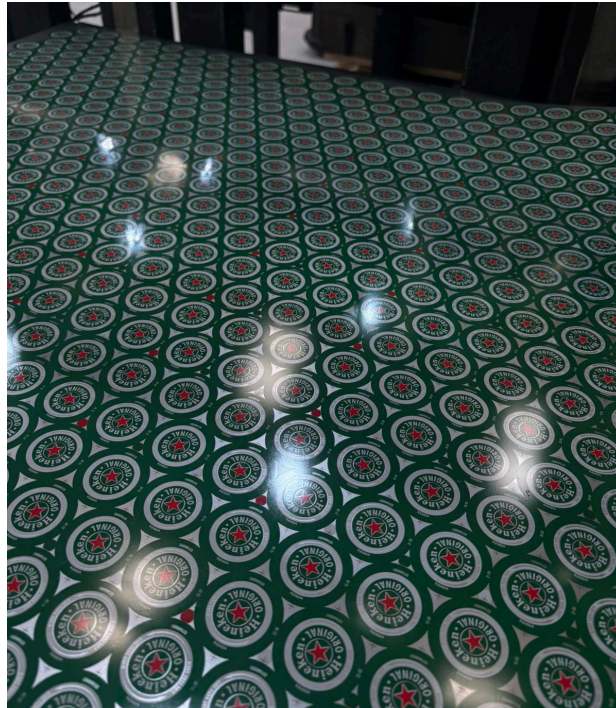
Figura 4 - Folha de aço empilhada.



Fonte: Autor, 2025

Ao chegarem na fábrica de embalagens, as chapas de aço que chegam virgens, passam inicialmente pelo processo de envernizamento, onde recebem uma camada do verniz externo e logo após uma camada de verniz de adesão na parte interna. É válido lembrar que, dependendo da origem de fabricação, mais especificamente do fabricante, as folhas já são fornecidas com o revestimento de verniz aplicado na face externa. Após esta etapa, as folhas seguem para litografia, onde são inseridas as informações visuais do produto e o layout do cliente, conforme a Figura 5, e em seguida recebem uma camada do verniz protetor, que mantém a estética do produto, evitando manchas e arranhões. A cura térmica destes revestimentos é realizada por estufa e por secagem UV, promovendo a polimerização dos compostos e garantindo sua resistência ao calor, à abrasão e ao meio ácido (CALLISTER, 2007).

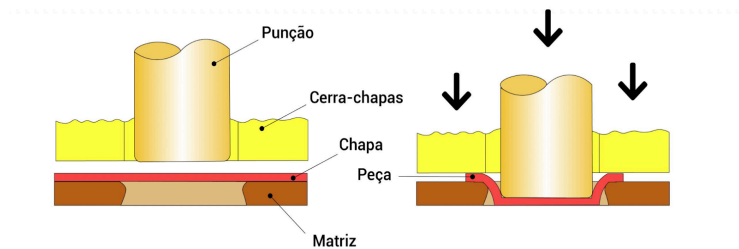
Figura 5 - Folha de aço litografada.



Fonte: Autor, 2025

Após os processos de envernizamento e litografia, as folhas seguem para a estampagem, processo típico de conformação plástica descrito na Figura 6, onde a chapa metálica anteriormente litografada é posicionada adequadamente e o punção, que é ferramenta cujo o formato correspondente ao interior da peça desejada, desce pressionando a folha contra a matriz. Durante o processo de conformação, o material flui ao redor do punção e preenche os contornos da matriz, formando a peça final. A conformação exige análise do coeficiente de encruamento, ductilidade e resistência ao escoamento do material, para que a peça final atenda aos requisitos dimensionais sem apresentar trincas, rugas ou retorno elástico (GROOVER, 2014). A força aplicada deve ser cuidadosamente calculada para evitar o rompimento da chapa ou o retorno elástico excessivo. Por fim, o cerra-chapas continua a atuar para manter a estabilidade da chapa e garantir que o escoamento do material seja uniforme.

Figura 6 - processo de estampagem de rolhas metálicas

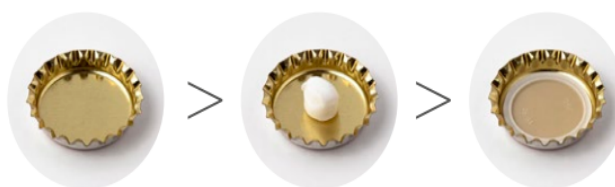


Fonte: ETMA Metal Parts (2024)

Após a estampagem, o processo de aplicação do vedante em rolhas metálicas é feito por meio das máquinas aplicadoras de vedante, iniciando com a extrusão contínua do selante, que é fundido e empurrado por um parafuso extrusor para formar um fluxo plástico contínuo.

No contexto de rolhas metálicas, a extrusão é um processo de conformação no qual o vedante é aquecido até atingir uma consistência pastosa e, em seguida, forçado a passar pela matriz de extrusão, onde é depositado diretamente no interior da peça já estampada, em quantidades pré-estabelecidas no formato de gota, mostrado na Figura 7. Após esta etapa, a rolha passa pelo carrossel moldador, onde o sistema realiza a moldagem do vedante, definindo o perfil final do *liner* dentro da rolha metálica, sendo *pry-off* ou *twist off*. (SACMI, 2025).

Figura 7 - Processo de aplicação de vedante



Fonte: SACMI, 2025

Por último, ocorre a etapa de cura do vedante, na qual a rolha é submetida a um forno de cura, onde o selante sofre um leve processo de reticulação física, aumentando sua aderência à parede interna da rolha metálica e conferindo-lhe propriedades elásticas e de recuperação dimensional (WICKS et al., 2007). Esse processo influencia diretamente na durabilidade do vedante e na resistência mecânica do sistema de fechamento.

2.5. Problemas Técnicos e Não Conformidades no Processo

No contexto de processos industriais, as não conformidades são definidas como qualquer desvio em relação aos requisitos especificados para o produto ou processo, podendo ocorrer tanto por falhas técnicas, operacionais ou até mesmo pela inadequação de materiais (ABNT NBR ISO 9000:2015). No setor de rolas metálicas, essas não conformidades podem comprometer significativamente a qualidade do produto final, colocando em risco a segurança do consumidor e a imagem do fabricante. Portanto, a identificação, o registro e a análise sistemática das não conformidades são práticas essenciais dentro dos sistemas de gestão da qualidade para promover a melhoria contínua e reduzir custos associados a retrabalhos, descartes ou devoluções (ABNT, 2015). Neste processo, algumas não conformidades se destacam pela frequência de ocorrência e pelos impactos diretos na funcionalidade e segurança do produto final, sendo falha de aderência no vedante a principal.

2.5.1. Migração e contaminação *set-off*

O fenômeno de contaminação *set-off*, também conhecido na indústria gráfica e de embalagens como decalque ou contra-impressão, refere-se à transferência indesejada de tinta, verniz ou constituintes de uma superfície revestida para o verso da folha adjacente quando estas são empilhadas ou bobinadas. No contexto da fabricação de embalagens metálicas, esse fenômeno torna-se crítico quando folhas que já receberam revestimento na face externa são submetidas a condições de armazenamento sob pressão antes do processamento da face interna (PETER & ULRICH, 2007).

A ocorrência dessa migração é governada por três fatores principais: a pressão exercida pelo empilhamento dos fardos pesados, o tempo de contato entre as superfícies e a temperatura durante o transporte e armazenamento. Em cadeias logísticas extensas, como é o caso de folhas importadas do exterior, onde os fardos de folhas metálicas permanecem estáticos e sob compressão por longos períodos, cria-se o ambiente ideal para a difusão molecular. Nesse cenário, componentes de

baixo peso molecular presentes no verniz externo, como plastificantes ou fotoiniciadores não curados, tendem a migrar para a superfície metálica interna da folha que está imediatamente acima (WICKS et al., 2007), podendo gerar problemas futuros na aplicação de outros revestimentos internos, como vernizes e vedantes.

2.5.2. Falha de aderência do vedante

A falha na aderência do vedante interno é uma das não conformidades mais críticas no processo de fabricação de rolhas metálicas, principalmente porque compromete diretamente a função principal da rolha: garantir vedação hermética ao conteúdo da embalagem. Esta falha ocorre quando o selante não se fixa de maneira adequada ao verniz de aderência e consequentemente ao substrato metálico, resultando em descolamento total ou parcial do vedante. Conforme ilustrado na Figura 8, é possível observar áreas onde o vedante se desprende completamente do fundo da rolha.

Figura 8 - Tampa com falha de aderência



Fonte: Autor, 2025

A falha de aderência de um vedante a um substrato, como o metal envernizado, é frequentemente associada à formação de uma Camada Limite Fraca (*Weak Boundary Layer* - WBL) na interface. Uma WBL é uma camada superficial de baixa coesão, formada pela migração de constituintes de baixa massa molar (como oligômeros, plastificantes ou contaminantes) para a superfície do material. Essa camada impede o contato íntimo e a ancoragem química ou mecânica entre o adesivo (vedante) e o substrato, resultando em falha coesiva ou adesiva, mesmo que o adesivo e o substrato sejam, em princípio, compatíveis (POCIUS, 2012).

A aplicação do vedante termoplástico exige controle rigoroso de temperatura e tempo de cura, pois esses parâmetros influenciam diretamente a aderência do vedante à superfície interna da rolha (WICKS et al., 2007). Temperaturas abaixo do ideal podem dificultar a fusão e o ancoramento do selante ao verniz interno; Já temperaturas elevadas em excesso podem causar degradação térmica do material, resultando em perda de propriedades mecânicas e adesivas (CALLISTER & RETHWISCH, 2020).

Já do ponto de vista da preparação da folha metálica, falhas no envernizamento interno e condições de estocagem também podem ser responsáveis por má aderência. O empilhamento prolongado de fardos já envernizados externamente, por exemplo, pode induzir o fenômeno de contaminação *set-off*, no qual ocorre a migração indesejada de constituintes da face externa para a interna devido ao contato direto sob pressão. Além disso, se o verniz de aderência aplicado previamente na parte interna da folha estiver com espessura fora do padrão, ou se o tempo de cura do forno de estufa for insuficiente, a superfície não estará preparada adequadamente para receber o vedante, o que reduz sua capacidade de adesão (POCIUS, 2012).

2.5.3. Impactos dessa falha na qualidade do produto final

A não conformidade mencionada têm impactos diretos e indiretos na qualidade do produto final. A falha na aderência do selante compromete a vedação hermética, levando à contaminação microbiológica e a redução do *shelf life* da bebida (ROBERTSON, 2013).

Portanto, diante da complexidade e da variedade de fatores existentes, é necessário que haja uma a realização de uma análise crítica e sistemática das possíveis causas dessas não conformidades. Essa abordagem é essencial para evitar a repetição de falhas e garantir a padronização dos processos. Nesse contexto, os testes de controle de qualidade, alinhados aos métodos de caracterização, mostram-se fundamentais para a tomada de decisões técnicas bem embasadas e para a melhoria contínua da qualidade na fabricação de rolhas metálicas.

2.6 Caracterização e Ensaios

2.6.1. Microscopia Eletrônica de Varredura e Espectroscopia por Energia Dispersiva (MEV/EDS)

Segundo Dedavid, Gomes e Machado (2007), a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), é uma técnica de caracterização morfológica e microestrutural utilizada para analisar superfícies com alta resolução e grande profundidade de campo permitindo a observação de topografia e distribuição de fases em materiais.

Diferentemente da microscopia óptica, o MEV utiliza um feixe fino de elétrons de alta energia emitido por uma fonte e focalizado sobre a amostra por meio de um sistema de lentes eletromagnéticas. À medida que o feixe varre a superfície, ocorrem diferentes interações entre os elétrons incidentes e os átomos do material, resultando na emissão de sinais que permitem gerar imagens e informações estruturais (GOLDSTEIN et al., 2018).

Acoplado ao MEV, o detector de Energia Dispersiva de Raios X (EDS) possibilita a análise qualitativa e semiquantitativa da composição química da superfície. Essa técnica baseia-se na detecção dos raios X característicos emitidos quando os elétrons do feixe interagem com os átomos do material, permitindo identificar os elementos presentes e suas distribuições (REED, 2005). Assim, MEV e EDS atuam de forma complementar: enquanto o MEV fornece informações morfológicas, o EDS fornece informações composicionais.

No presente estudo, o uso integrado de MEV-EDS é essencial para avaliar a qualidade da interface entre o vedante e o verniz de aderência aplicados nas rolhas metálicas, permitindo identificar falhas, descontinuidades, variações de espessura e possíveis contaminações químicas que possam comprometer a adesão e o desempenho final do sistema de vedação.

2.6.2. Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massa (GC-MS)

Segundo Skoog et al. (2018), A Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massa (GC-MS) é uma técnica analítica amplamente empregada na identificação e quantificação de compostos orgânicos voláteis e semivoláteis.

No processo de cromatografia gasosa, a amostra é primeiramente vaporizada e transportada por um gás inerte através de uma coluna revestida com uma fase estacionária. A separação dos componentes ocorre em função das interações físico-químicas entre as moléculas e a fase estacionária, bem como das diferenças de volatilidade dos analitos (SKOOG et al., 2018). Os compostos que apresentam menor afinidade pela fase estacionária ou maior volatilidade migram mais rapidamente, resultando em picos distintos no cromatograma.

Após a separação, os compostos separados são direcionados para o espectrômetro de massas. Nessa etapa, ocorre a ionização das moléculas, gerando íons fragmentados que são separados conforme sua relação massa/carga. O espectro resultante funciona como uma impressão digital molecular, permitindo a identificação precisa dos compostos por comparação com bibliotecas de espectros previamente catalogados (SKOOG et al., 2018).

2.6.3. Microscopia Confocal

A Microscopia Confocal é uma técnica óptica avançada de imagem que permite a obtenção de imagens com alta resolução espacial e profundidade de campo, sendo especialmente útil para a observação tridimensional de superfícies e estruturas internas. Seu princípio básico consiste na utilização de um sistema de iluminação pontual e detecção seletiva de luz proveniente de planos focais específicos, eliminando a luz fora de foco e gerando imagens com grande nitidez (PAWLEY, 2006; DIASPRO, 2010).

Para este estudo, a microscopia confocal é utilizada como ferramenta complementar para a caracterização da interface entre o vedante e o verniz interno aplicado nas rolhas metálicas. Sua principal contribuição está na análise tridimensional e quantitativa da topografia da superfície.

2.6.4. Microscopia Óptica

A microscopia óptica é uma das técnicas mais tradicionais e amplamente utilizadas na caracterização de materiais, permitindo a observação de aspectos microestruturais por meio da interação da luz visível com a superfície da amostra.

Mesmo com o avanço de métodos mais sofisticados, essa técnica permanece essencial por oferecer uma visualização rápida, acessível e eficaz da morfologia e das fases presentes nos materiais (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

O princípio fundamental da microscopia óptica baseia-se na incidência de luz sobre a amostra, seguida da ampliação da imagem por um conjunto de lentes objetivas e oculares. Embora não atinja a mesma resolução de técnicas de microscopia eletrônica, sua eficácia na análise preliminar e na avaliação de padrões microestruturais faz dela uma ferramenta indispensável em estudos metalúrgicos, poliméricos e de materiais compósitos (CALLISTER & RETHWISCH, 2020).

No contexto deste trabalho, a microscopia óptica é utilizada como técnica de análise inicial para a avaliação do revestimento e das interfaces presentes nas rolhas metálicas. Por meio dessa observação, é possível identificar falhas microscópicas e defeitos superficiais que possam comprometer a adesão entre as camadas, contribuindo para a compreensão global do desempenho dos sistemas de vedação.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada neste trabalho é de natureza qualitativa e exploratória, fundamentada em um estudo de caso documentado em fevereiro de 2025, na linha de produção de rolhas metálicas em uma fábrica de embalagens para alimentos localizada em Abreu e Lima - PE. O caso em questão envolveu rolhas do tipo *pry-off*, aplicadas com verniz interno do tipo *laca-free* e selante do tipo *free*, cuja a não conformidade registrada foi a falha de aderência do vedante à superfície metálica interna.

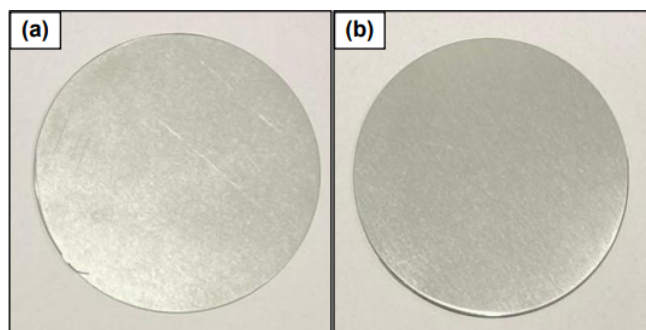
Para a realização deste estudo, adotou-se uma abordagem comparativa entre folhas metálicas de dois fornecedores distintos, situados em diferentes regiões geográficas. O objetivo foi confrontar um material de referência, com histórico de qualidade aprovado (amostra conforme), com um lote segregado especificamente devido a falhas de aderência do vedante (amostra não conforme). A investigação abrangeu tanto o substrato original (virgem) quanto as folhas já envernizadas. Dessa forma, as amostras foram codificadas da seguinte maneira:

- Amostra nacional (Fornecedor N): Folha virgem (RN) e Folha com verniz (RNV);
- Amostra internacional (Fornecedor I): Folha virgem (RI) e Folha com verniz (RIV).

As amostras das folhas metálicas utilizadas na fabricação de rolha *pry-off*, fabricadas a partir da utilização de verniz *laca-free* e selante *free*, foram coletadas aleatoriamente de um lote específico (lote em não conformidade). Os ensaios de caracterização e testes associados ao presente trabalho foram desenvolvidos no Laboratório de Materiais Compósitos e Integridade estrutural (Compolab-LBC/LITPEG) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e nos laboratórios da empresa AFINKO Polímeros, localizada no Estado de São Paulo.

As amostras foram selecionadas (Figura 9) e encaminhadas para ensaios morfológicos e físico-químicos descritos a seguir:

Figura 9 - (a) Amostra RIV e (b) Amostra RNV (diâmetro aprox. Ø70 mm)

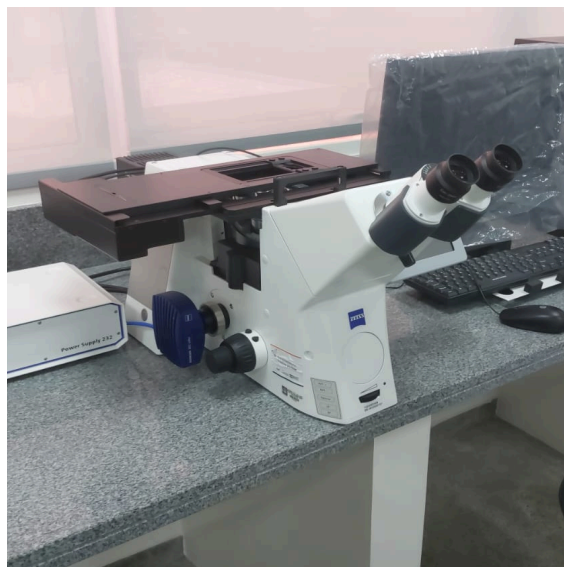


Fonte - Autor, 2025.

3.1 Microscopia Óptica

A caracterização morfológica preliminar das superfícies foi realizada por meio de microscopia óptica, visando uma avaliação estrutural inicial dos substratos. Para a realização deste ensaio, utilizou-se um microscópio ótico invertido da marca Zeiss, modelo Observer Zm1, Figura 10, pertencente ao CompoLab-LBC/LITPEG.

Figura 10 - Microscópio Óptico Observer Zm1.



Fonte: Autor (2025)

As análises foram conduzidas utilizando uma ampliação ocular de 100x e 50x, o que permitiu uma melhor visualização da morfologia superficial das amostras. O procedimento abrangeu tanto os substratos metálicos virgens quanto as folhas com aplicação de verniz, com o objetivo de identificar padrões de acabamento, marcas de laminação, uniformidade do revestimento e a presença de eventuais defeitos ou descontinuidades macroscópicas na superfície do material.

3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura e Espectroscopia por Energia Dispersiva (MEV/EDS)

A análise da morfologia dos revestimentos e superfícies foi realizada através da análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) com Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios-X (EDS), pertencente a Afinko-SP. O equipamento utilizado foi o microscópio eletrônico de varredura da marca FEI, modelo INSPECT S50, com limite de detecção (EDS) máxima de 0,1% em massa) e tensão de aceleração de 20kV (Figura 11). As análises foram realizadas nas amostras RIV e RNV para avaliar a qualidade da interface entre o substrato e o verniz de aderência aplicados nas rolhas metálicas, permitindo identificar falhas, descontinuidades, variações de espessura e possíveis contaminações químicas que possam comprometer a adesão e o desempenho final do sistema de vedação.

Figura 11 - Microscópio Eletrônico de Varredura modelo INSPECT S50



Fonte: Capital Asset Exchange & Trading (2025)

3.3 Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massa (GC-MS)

A Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massa (GC-MS) foi realizada no cromatógrafo a gás Shimadzu QP-2010 acoplado ao Espectrômetro de Massas TQ-8040 Shimadzu, pertencente a AFINKO. O equipamento possui características semelhantes ao modelo apresentado na Figura 12. As análises foram realizadas nas folhas metálicas com verniz aplicado. Os dados foram comparados diretamente com o acervo espectral dos laboratórios da AFINKO, que dispõe de uma

biblioteca de massas previamente catalogadas para identificação de compostos orgânicos voláteis e semi-voláteis.

Figura 12 - Espectrômetro de Massas TQ-8040 Shimadzu



Fonte: Shimadzu (2025)

Os parâmetros utilizados pelo laboratório estão especificados conforme Quadro 1 abaixo:

Quadro 01 - Condições instrumentais e parâmetros operacionais do ensaio de GC-MS

Parâmetro	Condição / Especificação
Tipo de Amostra	Sólida
Preparo de Amostra	Lavagem (Solvente: hexano-acetona 1:1 - v/v)
Amostragem	Líquida (Concentração: 1 mg/mL)
Coluna Cromatográfica	DB-5MS-UI (30 m × 0,25 mm d.i.; filme 0,25 µm)
Gás de Arraste	Hélio
Temperaturas do Sistema	Injetor: 250 °C; Interface: 280 °C; Detector: 280 °C
Programa de Aquecimento	70 °C (5 min); rampa de 10 °C/min até 310 °C (15 min)
Volume de Injeção	1 µL
Taxa de Split	01:20
Faixa de Aquisição (m/z)	45 a 700

Fonte: Autor (2025).

3.4 Microscopia Confocal

A análise da morfologia e topografia tridimensional das superfícies foi realizada utilizando o equipamento Microscopia Confocal utilizando o equipamento

Laser Scanning Microscope (LSM) 700 da ZEISS (Figura 13) para análise tridimensional das superfícies e verificação da rugosidade da folha metálica com verniz. As amostras analisadas foram: folha virgem conforme (RN), folha com verniz conforme (RNV), folha virgem não conforme (RI) e folha com verniz não conforme (RIV).

Figura 13 - Microscópio Confocal LSM 700



Fonte: Autor (2025)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As amostras selecionadas para este estudo correspondem às folhas metálicas de dois fornecedores distintos, situados em diferentes regiões geográficas. A investigação abrangeu tanto o substrato original (virgem) quanto as folhas já envernizadas. O objetivo foi compreender como as diferenças de morfologia superficial e composição química influenciam no desempenho de adesão do vedante entre a amostra de histórico conforme e a amostra não conforme.

4.1. Avaliação da Morfologia das Folhas

A Figura 14 (a-h) mostra a caracterização por microscopia ótica e confocal da superfície das amostras RN, RNV, RI e RIV.

É possível observar nas imagens por microscopia óptica para a amostra conforme virgem RN uma superfície com ranhuras provenientes do processo de laminação para obtenção das folhas metálicas. Já na amostra com verniz, RNV, nota-se que estas marcas são menos pronunciadas devido ao recobrimento com o verniz Figura 14 (a,c). No entanto, verifica-se para as amostras RI e RIV, Figura 14 (e, g), que a morfologia da superfície se mantém mesmo após a aplicação do verniz, ou seja, nota-se as marcas de ranhuras provenientes da laminação nos dois casos.

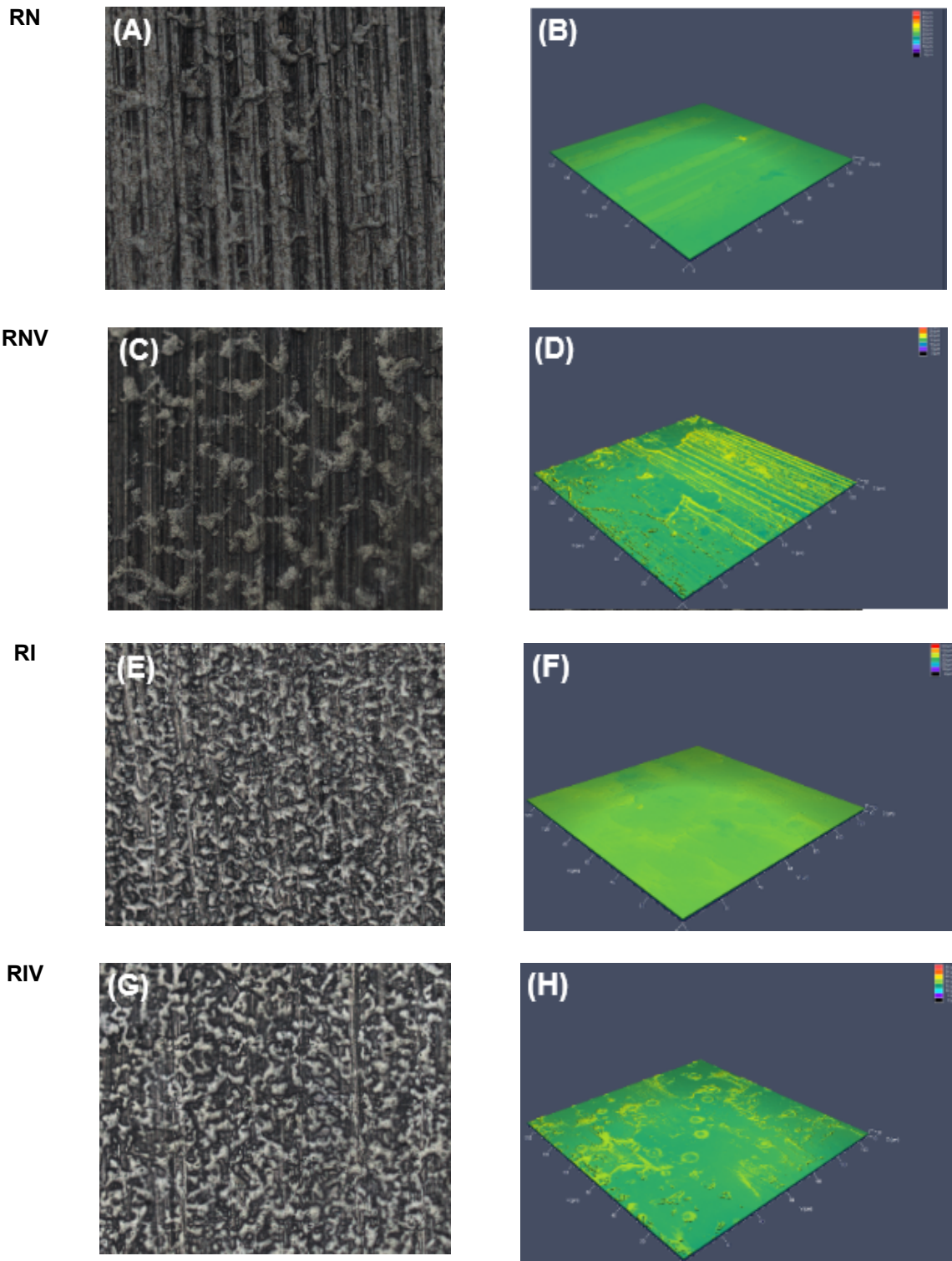
A análise de topografia superficial por microscopia confocal permitiu observar contrastes significativos entre as amostras selecionadas das folhas, Figura 14 (b,d,f,h).

Em relação aos mapas topográficos, observa-se que a folha virgem (RN) apresenta uma superfície sem diferenças de altura. Já para a amostra com verniz, Figura 14d, observa-se uma superfície uniforme e texturizada, com sulcos paralelos. Este tipo de morfologia tende a favorecer a adesão mecânica do verniz, uma vez que superfícies moderadamente rugosas podem aumentar a área de contato e promover o ancoramento do revestimento (BHUSHAN, 2010).

Já para os mapas topográficos das folhas importadas RI e RIV (Figura 14f, 14h), observa-se que a folha virgem também não apresentou diferenças na altura da superfície, no entanto, após a aplicação do verniz nota-se uma superfície com picos e vales mal distribuídos na área da folha, caracterizada por regiões mais elevadas. Esse comportamento é típico de substratos com baixa energia superficial, os quais

dificultam a ancoragem do verniz e favorecem a formação de ilhas e a delaminação local do revestimento após a cura térmica (MITTAL, 2013).

Figura 14 - À esquerda, micrografias ópticas (A e C com ampliação 100x e E e G com ampliação 50x) mostrando a textura das amostras: (a) RN, (c) RNV, (e) RI e (g) RIV. À direita, mapas topográficos por microscopia confocal (Área de varredura: X 120 μ m x Y 120 μ m) detalhando o relevo das superfícies correspondentes: (b) RN, (d) RNV, (f) RI e (h) RIV.



Sendo assim, embora a análise topográfica confirme a precariedade da ancoragem física na amostra importada (RIV), ela não revela os agentes causadores dessa instabilidade. No entanto, para determinar se essa baixa aderência decorre de alterações na composição química da folha ou da presença de contaminantes imperceptíveis à microscopia, faz-se necessário aprofundar a investigação por meio de análises de caracterização química e elementar.

4.2. Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios X (EDS)

Os resultados de EDS obtido na superfície das folhas com verniz (RNV e RIV), estão mostrados nos Quadros 2 e 3, respectivamente.

Quadro 2 - Resultados de EDS para a superfície da amostra de folha conforme envernizada (RNV).

Elemento	(%) em Massa					
	A	B	C	D	E	F
C	4,37	6,18	4,22	10,54	8,01	14,06
Cr	1,34	1,37	1,39	1,23	1,31	1,34
Fe	93,11	89,48	94,12	86,44	89,30	84,28
Cl	0,29	0,34	-	-	-	-
Al	0,23	0,21	0,27	-	-	-
Na	0,67	1,30	-	-	-	-
F	-	1,13	-	1,16	1,38	-
O	-	-	-	0,64	-	-
Si	-	-	-	-	-	0,16
Ca	-	-	-	-	-	0,16

Fonte: Laboratório AFINKO Polímeros, 2025.

Quadro 3 - Resultados de EDS para a superfície da amostra da folha não conforme com verniz (RIV).

Elemento	(%) em Massa					
	A	B	C	D	E	F
C	4,78	8,39	4,93	12,07	10,09	9,13
Al	0,60	0,70	0,35	0,61	0,22	0,18
Cr	1,47	1,57	1,58	1,40	1,62	1,46
Fe	92,93	85,72	90,19	81,96	88,07	88,34
Si	0,23	0,93	-	0,46	-	-
O	-	1,04	0,56	1,15	-	-
F	-	1,12	0,95	0,85	-	0,89
Ca	-	0,53	0,15	0,48	-	-
Na	-	-	0,48	0,68	-	-
Cl	-	-	0,28	0,34	-	-
K	-	-	0,53	-	-	-

Fonte: Laboratório AFINKO Polímeros, 2025.

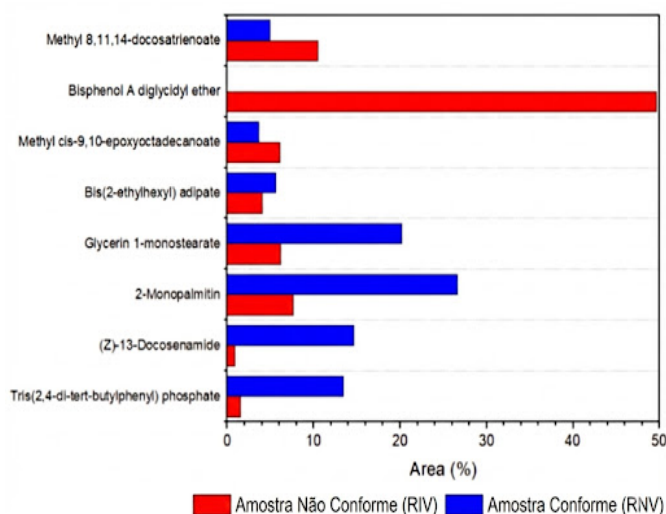
A análise revelou que as superfícies das duas amostras possuem composição majoritária de ferro (Fe), acompanhada de teores menores de carbono (C) e cromo (Cr), coerentes com ligas metálicas aplicadas em folhas de aço utilizadas na indústria de embalagens. Pequenas variações na presença de elementos como Al, Si, Na, F e Ca foram observadas entre os diferentes pontos analisados, refletindo possíveis resíduos de processamento. Contudo, a análise não apontou contaminações inorgânicas críticas que justificassem a falha, torna-se fundamental investigar a natureza química dos compostos orgânicos adsorvidos na superfície, etapa realizada por meio da cromatografia.

4.3. Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massa (GC-MS)

Com o objetivo de investigar a possível presença de contaminantes orgânicos na superfície das folhas metálicas não conforme, foi realizada a análise por GC-MS nas amostras de folhas metálicas conforme com verniz (RNV) e não conforme com verniz (RIV).

A comparação entre os perfis cromatográficos das amostras RNV e RIV revelou a presença de classes de compostos semelhantes, principalmente ésteres, amidas e aditivos fosforados. Entretanto, a análise demonstrou diferenças importantes entre as duas amostras. O bisfenol A diglicidil éter (BADGE) foi identificado exclusivamente na amostra RIV (não conforme com verniz), visualizado na Figura 15 a seguir, evidenciando uma contaminação da superfície interna da amostra.

Figura 15 - Comparação entre as substâncias identificadas nas amostras



Fonte: Laboratório AFINKO Polímeros (2025)

É importante ressaltar que a folha metálica (RI) já recebe do fabricante uma camada de revestimento externo, diferente da folha (RN). Essa condição pré-existente torna-se um fator crítico quando associada à extensa cadeia logística demandada por esse fornecedor. Visto que o material permanece estocado em fardos por períodos prolongados durante o transporte e o armazenamento, a superfície externa envernizada fica submetida a uma compressão contínua, o que potencializa a ocorrência de fenômenos de migração de substâncias e alterações superficiais antes mesmo do início do processamento fabril.

Os resultados obtidos indicam que a presença de BADGE na folha importada não decorre do verniz interno, mas sim do revestimento externo já aplicado pelo fabricante da folha importada, o qual apresenta caráter epoxídico.

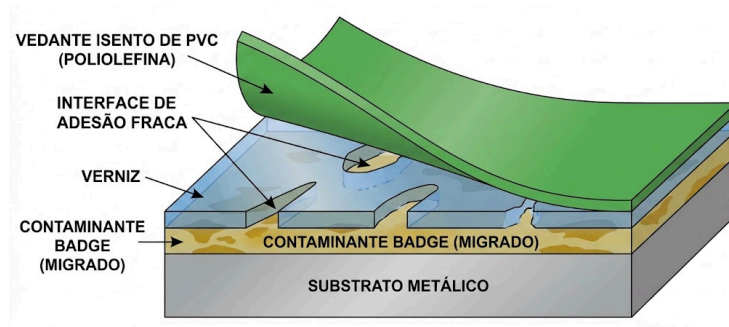
Conforme descrito por Wicks et al. (2007), sistemas epóxi derivados de BADGE são amplamente utilizados em revestimentos industriais devido à sua elevada resistência mecânica e química. No entanto, estes sistemas podem liberar oligômeros epoxídicos de baixo peso molecular, principalmente quando a cura não é completa. Assim, analisando a situação do longo processo logístico, durante o empilhamento e armazenamento em fardos, a superfície externa epoxídica permanece em contato direto com a superfície interna não revestida das folhas metálicas, criando condições favoráveis para a migração do BADGE para a face interna.

Essa migração superficial é coerente com o mecanismo descrito por Pocius (2012), que caracteriza substâncias móveis, como oligômeros epoxídicos residuais, como formadores de *weak boundary layers* (WBL). O autor explica que a migração de constituintes de baixa massa molar para a superfície do material gera uma camada de baixa coesão. Essa camada atua como uma barreira física, impedindo que o adesivo interaja diretamente com o substrato base, o que compromete a eficácia da união. No contexto deste trabalho, o BADGE migrado para o interior da folha passa a recobrir a superfície que posteriormente receberá o verniz *laca-free* e, por fim, o vedante *free*. Isso significa que o verniz não está aderindo à superfície metálica, mas sim a uma camada ultrafina de resina epóxi parcialmente reagida, incompatível com as exigências de molhabilidade e adesão desses sistemas.

Robertson (2013) destaca que a eficiência de vedantes isentos de PVC, tipicamente poliolefinicos, depende diretamente de um substrato limpo e com elevada energia de superfície. Sob essa ótica, a presença de BADGE migrado na

interface interna se comporta como um contaminante crítico, interferindo na ancoragem do verniz e, consequentemente, enfraquecendo a união com o composto vedante, conforme a Figura 16.

Figura 16 - Mecanismo de falha de adesão por contaminação de BADGE



Fonte - Autor (2025)

5. CONCLUSÃO

O presente experimento atingiu seu objetivo geral ao diagnosticar a causa técnica fundamental da falha de aderência do vedante em rolhas metálicas para o estudo em questão, validando a eficácia da abordagem sistemática e multitécnica adotada.

As análises iniciais via Microscopia Óptica e Confocal demonstraram que, embora existam variações texturais entre as folhas de fornecedores distintos, a rugosidade superficial não se configurou como fator determinante para a falha. Ainda que a presença de picos e vales irregulares na amostra não conforme sugira uma alteração topográfica, a morfologia isoladamente não justificou a delaminação observada. Conforme elucidado por Mittal (2013), a adesão depende intrinsecamente da energia de superfície e da molhabilidade, fatores que podem ser comprometidos por agentes químicos invisíveis à análise morfológica. Em complemento, a técnica de MEV/EDS confirmou que a composição elementar das ligas metálicas (Fe, C e Cr) estava dentro dos padrões esperados para ambos os fornecedores, descartando a hipótese de oxidação excessiva ou contaminação por elementos inorgânicos na interface.

A investigação química por Cromatografia Gasosa (GC-MS) mostrou-se decisiva para o diagnóstico, ao identificar a presença de Bisfenol A Diglicidil Éter (BADGE) exclusivamente na superfície interna das amostras não conformes (RIV). A detecção deste composto, constituinte típico de revestimentos epóxi, em uma face que deveria apresentar apenas o verniz de adesão, evidencia a ocorrência de contaminação (PETER; ULRICH, 2007).

Validou-se, portanto, a premissa de que o extenso processo logístico e o armazenamento em fardos submetidos à pressão e variações térmicas favoreceram o fenômeno de migração set-off. Segundo Robertson (2013), o contato íntimo entre superfícies em condições de empilhamento pode promover a transferência de constituintes de baixo peso molecular entre as camadas. Neste caso, o BADGE migrou do revestimento externo para a face interna da folha adjacente, atuando como uma barreira física de baixa energia superficial. Esse filme contaminante impediu a interação química necessária entre o verniz e o vedante, prejudicando a ancoragem, visto que a adesão eficaz requer substratos livres de interferentes (POCIUS, 2012).

Dessa forma, considerando que a contaminação por BADGE ocorre devido à migração de componentes do revestimento externo durante a cadeia logística, recomenda-se a revisão dos procedimentos de aquisição de matérias-primas. Uma estratégia mais segura consiste na utilização de substratos sem revestimento prévio para o transporte de longa distância, ou a implementação de controles de processo mais rigorosos, conforme preconizado por Robertson (2013), especialmente aquelas destinadas à fabricação de embalagens para contato com alimentos, como as rolhas metálicas. Adicionalmente, sugere-se que as folhas sejam submetidas a um tratamento de superfície preliminar antes da inserção no processo produtivo, visando assegurar a remoção de resíduos orgânicos e promover a preparação da interface para a correta ancoragem do sistema de vedação (POCIUS, 2012).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRALATAS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS FABRICANTES DE LATAS DE ALUMÍNIO. **Relatório anual do setor de embalagens metálicas 2023**. Brasília: ABRALATAS, 2023. Disponível em: <https://www.abralatas.org.br>. Acesso em: 10 fev. 2025.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 9000: sistemas de gestão da qualidade – fundamentos e vocabulário**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

AÇOS BRASIL. **Relatório de sustentabilidade 2022**. Rio de Janeiro: Instituto Aços Brasil, 2022. Disponível em: <https://www.acobrasil.org.br>. Acesso em: 10 fev. 2025.

BHUSHAN, B. **Introduction to tribology**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2013.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

CALLISTER, W. D. **Materials science and engineering: an introduction**. 8. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering: an introduction**. 10. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2020.

CAPITAL ASSET EXCHANGE & TRADING. **Microscópio eletrônico de varredura Inspect S50**. 2025. Disponível em: <https://www.caetrading.com>. Acesso em: 10 fev. 2025.

CONSELHO REGIONAL DE QUÍMICA – IV REGIÃO. **Polímeros: estrutura e propriedades**. São Paulo: CRQ-IV, 2011. Disponível em: <https://www.crq4.org.br>. Acesso em: 10 fev. 2025.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

DESHWAL, G. K.; PANJAGARI, N. R. **Review on metal packaging: materials, forms, food applications, safety and recyclability**. Journal of Food Science and Technology, v. 57, n. 1, p. 84-96, 2020.

DIASPRO, A. **Confocal and two-photon microscopy: foundations, applications, and advances**. New York: Wiley-Liss, 2010.

ETMA METAL PARTS. **Processo de estampagem: guia técnico. 2024**. Disponível em: <https://etmametalparts.com>. Acesso em: 10 fev. 2025.

GOLDSTEIN, J. I. et al. **Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis**. 4. ed. New York: Springer, 2018.

GROOVER, M. P. **Fundamentos de manufatura moderna**. 5. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014.

LABORATÓRIO AFINKO POLÍMEROS. **Relatório técnico de análise: caracterização de falha em rolhas metálicas**. São Carlos: Afinko, 2025.

MITTAL, K. L. (Ed.). **Contact angle, wettability and adhesion**. Leiden: Brill, 2013.

PACK GATE. **Tendências em embalagens metálicas para 2025**. São Paulo: Pack Gate, 2025. Disponível em: <https://packgate.com.br>. Acesso em: 10 fev. 2025.

PAWLEY, J. B. (Ed.). **Handbook of biological confocal microscopy**. 3. ed. New York: Springer, 2006.

PETER, K.; ULRICH, D. **Can coatings: chemistry and application**. Stuttgart: Vincentz Network, 2007.

POCIUS, A. V. **Adhesion and adhesives technology: an introduction**. 3. ed. Cincinnati: Hanser Publications, 2012.

REED, S. J. B. **Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

ROBERTSON, G. L. **Food packaging: principles and practice**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2013.

SACMI GROUP. **Metal closures: technical guide and process specifications – 2025** edition. Imola: SACMI, 2025. Disponível em: <https://www.sacmi.com>. Acesso em: 10 fev. 2025.

SHIMADZU CORPORATION. **Gas chromatograph mass spectrometer GCMS-TQ8040**: specification sheet. Kyoto: Shimadzu, 2025.

SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R. **Principles of instrumental analysis**. 7. ed. Boston: Cengage Learning, 2018.

WICKS, Z. W. et al. **Organic coatings: science and technology**. 3. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.