

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
FATEC PROFESSOR JESSEN VIDAL**

**KAUÊ COSTA DE MELO
LUCAS ROBERTO DE AZEVEDO ROSA**

**ANÁLISE DA VIABILIDADE E EFICÁCIA DA APLICAÇÃO
DE REVESTIMENTO DE CONVERSÃO QUÍMICA DE
CROMATO EM REPAROS ESTRUTURAIS DA INDÚSTRIA
AERONÁUTICA**

São José dos Campos

2026

**KAUÊ COSTA DE MELO
LUCAS ROBERTO DE AZEVEDO ROSA**

**ANÁLISE DA VIABILIDADE E EFICÁCIA DA APLICAÇÃO
DE REVESTIMENTO DE CONVERSÃO QUÍMICA DE
CROMATO EM REPAROS ESTRUTURAIS DA INDÚSTRIA
AERONÁUTICA**

Trabalho de Graduação apresentado à
Faculdade de Tecnologia de São José dos
Campos, como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do título de
Tecnólogo em Projetos de Estruturas
Aeronáuticas.

Orientador: Dr. Bruno Peruchi Trevisan

São José dos Campos

2026

FICHA CATALOGRÁFICA – Biblioteca Fatec São José dos Campos Prof. Jessen Vidal
Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação

MELO, Kauê Costa

Análise da viabilidade e eficácia de revestimento de conversão de cromato reparos estruturais da indústria aeronáutica. Kauê Costa de Melo, Lucas Roberto de Azevedo Rosa – São José dos Campos, 2026.

33f. (número total de folhas do TG)

Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Tecnologia em nome do curso da graduação. Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos Professor Jessen Vidal, 2026.

Orientador Interno ou Principal: Dr. Bruno Peruchi Trevisan

1. Revestimento de conversão. 2. Corrosão. 3. Aderência. I. Faculdade de Tecnologia. FATEC de São José dos Campos: Professor Jessen Vidal. II. Título

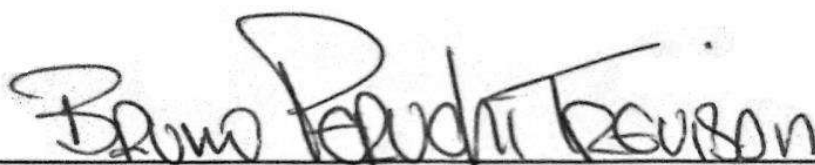
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MELO, K.C., ROSA, L.R.A. **Análise da viabilidade e eficácia de revestimento de conversão química de cromato em reparos estruturais da indústria aeronáutica**. 2026. 33f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior em Projeto de Estruturas de Aeronaves) - Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos Professor Jessen Vidal, São José dos Campos, 2026.

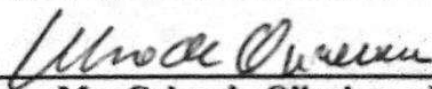
**KAUÊ COSTA DE MELO
LUCAS ROBERTO DE AZEVEDO ROSA**

**ANÁLISE DA VIABILIDADE E EFICÁCIA DA APLICAÇÃO
DE REVESTIMENTO DE CONVERSÃO QUÍMICA DE
CROMATO EM REPAROS ESTRUTURAIS DA INDÚSTRIA
AERONÁUTICA**

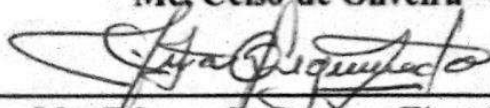
Trabalho de Graduação apresentado à
Faculdade de Tecnologia de São José dos
Campos, como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do título de
Tecnólogo em Projetos de Estruturas
Aeronáuticas.



Prof. Dr. Bruno Peruchi Trevisan – FATEC SJC



Me. Celso de Oliveira – FATEC SJC



Me. Edmar de Queiroz Figueiredo – FATEC SJC

DATA DA APROVAÇÃO

11/06/2026

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecer a Deus, por ter iluminado nosso caminho durante essa trajetória. Agradecimentos ao Professor Dr. Bruno Peruchi Trevisan pela dedicação e orientação durante a produção do presente trabalho e aos demais professores do curso de Tecnologia em Projetos de Estrutura de Aeronaves pelos ensinamentos transmitidos aos autores ao decorrer do curso.

RESUMO

O presente trabalho investiga a aplicação da alodinação em reparos de fuselagem e peças estruturais de aeronaves, destacando sua importância na proteção anticorrosiva e na aderência de superfícies. O estudo aborda a alodinação *Cr-Free*, que substitui o cromo hexavalente por alternativas ambientalmente seguras, mantendo a proteção química da superfície e permitindo a aplicação de modificações hidrofóbicas. A metodologia empregada foi a revisão bibliográfica de normas técnicas, artigos especializados e manuais de manutenção de aeronaves, complementado por análise comparativa de métodos de preparação de superfícies, como alodinação e pós-tratamento químico. Os resultados evidenciam que a alodinação *Cr-Free* oferece significativa proteção contra corrosão, melhora a aderência de primers e adesivos estruturais e contribui para a uniformidade das superfícies reparadas. O pós-tratamento com fluorossilanos como o FAS-17 aumenta a hidrofobicidade e o desempenho anti-incrustante da superfície, sem comprometer a proteção química original da camada de conversão. Comparada a métodos convencionais, a alodinação *Cr-Free* apresenta vantagens adicionais em termos de segurança ambiental, funcionalidade da superfície e compatibilidade com revestimentos avançados.

Palavras-chave: Alodinação; Cr-Free; reparos estruturais; fuselagem; proteção anticorrosiva; aderência de superfícies.

ABSTRACT

The present work investigates the application of alodine treatment in aircraft fuselage repairs and structural components, highlighting its importance in corrosion protection and surface adhesion. The study addresses Cr-Free alodine, which replaces hexavalent chromium with environmentally safe alternatives while maintaining the chemical protection of the surface and allowing the application of hydrophobic modifications. The methodology employed was a literature review of technical standards, specialized articles, and aircraft maintenance manuals, complemented by a comparative analysis of surface preparation methods, such as alodinization and chemical post-treatment. The results show that Cr-Free alodine provides significant corrosion resistance, improves the adhesion of primers and structural adhesives, and contributes to the uniformity of repaired surfaces. Post-treatment with fluorosilanes such as FAS-17 increases hydrophobicity and enhances the anti-fouling performance of the surface without compromising the original chemical protection of the conversion coating. Compared to conventional methods, Cr-Free alodine offers additional advantages in terms of environmental safety, surface functionality, and compatibility with advanced coatings.

Keywords: Alodinization; Cr-Free; structural repairs; fuselage; anti-corrosion protection; surface adhesion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Material após a alodinação x Material antes da alodinação.....	15
Figura 2 – Tanque de conversão química de conversão Alodine	16
Figura 3 – Normas e especificações para revestimento de conversão.....	17
Figura 4 – Tipos e classes de revestimento de conversão de cromato	18
Figura 5 – Ilustração esquemática de um sistema de revestimento para proteção contra corrosão em estruturas aeronáuticas	19
Figura 6 – Esquema representando os mecanismos de corrosão	21
Figura 7 – Painel tipo sanduiche de alumínio aeronáutico	22
Figura 8 – Desenho técnico desenvolvido em software de modelagem (CAD).....	23
Figura 9 – Router CNC 2030.....	24
Figura 10 – Preparação da superfície	25
Figura 11 – Aplicação do <i>Bonderite M-CR 1132 Aero</i>	26
Figura 12 – Aplicação do <i>primer</i>	27
Figura 13 – Corpo de prova após tratamento superficial	27
Figura 14(A)– Fita adesiva 3M	28
Figura 14(B)– Teste de adesão sendo realizado.....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação e Aplicações das Ligas de Alumínio	14
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Área
AMS	<i>Aerospace Material Specification</i>
ANOVA	Análise de Variância (<i>Analysis of Variance</i>)
BAC	<i>Boeing Aircraft Company</i>
Cr-Free	Cromo-Livre (isento de Cr(VI))
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
V	Volume
CDP	Corpo de Prova
MRO	<i>Maintenance, Repair and Overhaul</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. Objetivo Geral	12
1.2. Objetivos Específicos	12
1.3. Proposta Metodológica	13
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1. Mecanismos de Proteção anti corrosiva por Conversão Química	14
2.2. Aplicações em reparos estruturais aeronáuticos	16
2.3. Normas e procedimentos de aplicação da alodinação	17
2.4. Estudos recentes sobre conversões químicas Cr-Free	18
2.5. Relevância do estudo e análise da substituição do Alodine 1200 por conversões Cr-Free	20
2.6. Processo de aplicação do tratamento de conversão química	20
3. METODOLOGIA	22
3.1. Materiais utilizados	22
3.2. Fabricação e usinagem do painel	23
3.3. Preparação da superfície	24
3.4. Aplicação técnica do alodine	25
3.5. Aplicação técnica do revestimento primário	26
3.6. Inspeção de qualidade e validação	27
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4.1. Inspeção de qualidade e validação	29
4.2. Eficácia da alodinação (Bonderite M-CR 1132 Aero)	29
4.3. Análise das condições de processamento	29
4.4. Teste de aderência (Validação final)	30
5. CONCLUSÃO	31
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

1. INTRODUÇÃO

A manutenção aeronáutica e o reparo são processos cruciais que devem assegurar a condição estrutural, a durabilidade e a segurança operacional dos elementos da aeronave, as superfícies metálicas expostas de certos materiais, especialmente ligas de alumínio comumente usadas na aviação, como as séries 2024-T3 e 7075-T6, são altamente suscetíveis à corrosão e à degradação em ambientes adversos. Além de tornar os reparos convencionais ineficazes, esses fatores prejudicam a vida útil de seções críticas da fuselagem e de outros componentes aeronáuticos.

Sob esse aspecto, a alodinação *Cr-Free*, ou tratamento de conversão isento de cromo hexavalente, tornou-se uma alternativa promissora. Além de oferecer proteção anticorrosiva por meio de mecanismos químicos, o processo favorece a aderência de primers, revestimentos e adesivos estruturais aplicados posteriormente. A tecnologia *Cr-Free* ainda possibilita a utilização de pós-tratamentos funcionais, como a aplicação de fluorossilanos (ex.: FAS-17), que intensificam a hidrofobicidade, reduzem incrustações e ampliam o desempenho superficial sem comprometer a proteção original da camada de conversão.

Apesar do avanço dessas abordagens na indústria aeronáutica, ainda há lacunas quanto à avaliação sistemática da eficácia da alodinação *Cr-Free* em reparos de fuselagem e demais componentes estruturais. Estudos comparativos que integrem a análise da proteção química e dos efeitos funcionais de pós-tratamentos são fundamentais para consolidar o uso dessa tecnologia em procedimentos de manutenção e reparo.

1.1. Objetivo Geral

O presente documento tem como objetivo relatar a investigação e a aplicação da alodinação isentas de cromo em reparos de aeronaves, com foco na proteção anticorrosiva e no aumento da confiabilidade e desempenho das superfícies metálicas tratadas.

1.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho consistem em analisar a eficácia da alodinação *Cr-Free* na proteção contra a corrosão em ligas de alumínio utilizadas na indústria aeronáutica, realizando uma comparação com o processo tradicional de alodinação contendo cromo hexavalente. Além disso, busca-se avaliar a aderência de *primers* e revestimentos aplicados sobre superfícies tratadas com alodinação *Cr-Free*, verificando o desempenho do tratamento em aplicações de reparo aeronáutico.

O estudo também pretende investigar a durabilidade e a uniformidade das superfícies reparadas por meio da alodinação *Cr-Free*, considerando a qualidade do revestimento obtido e sua resistência ao longo do tempo. Para complementar a análise, será realizada a quantificação e comparação da aderência de *primers* e revestimentos entre os processos *Cr-Free* e tradicional, utilizando o ensaio de fita (*cross-hatch*), conforme estabelecido pela norma ASTM International ASTM D3359.

Por fim, o trabalho visa avaliar a sustentabilidade do processo *Cr-Free*, considerando a redução do uso de cromo hexavalente e os impactos ambientais e ocupacionais associados, destacando os benefícios relacionados à saúde humana, à segurança dos profissionais envolvidos e à preservação ambiental.

1.3. Proposta Metodológica

A pesquisa será conduzida por meio de coleta e análise de informações técnicas encontrado em livros especializados, normas da aviação, artigos científicos e manuais de fabricantes, com foco nos processos de alodinação aplicados em ligas de alumínio aeronáuticas. Serão investigados tipos de alodine, métodos de aplicação, controle de qualidade, aderência de *primers*, resistência à corrosão e desempenho mecânico dos reparos.

Além disso, será realizado um estudo comparativo entre a alodinação e métodos tradicionais de preparação de superfície, avaliando vantagens, limitações e recomendações de uso em manutenção de fuselagem e peças estruturais. Essa abordagem permitirá consolidar dados técnicos relevantes e fornecer subsídios para procedimentos mais seguros, eficientes e alinhados às normas da indústria aeronáutica, como AC 43.13-1B e diretrizes de fabricantes certificados.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Mecanismos de proteção anti corrosiva por conversão química

A alodinação, também denominada conversão química de alumínio, constitui um processo de tratamento de superfície essencial. Na prática, tem como finalidade formar uma camada protetora de óxidos ou complexos metálicos sobre as ligas de alumínio, com o intuito de aumentar a resistência à corrosão e melhorar a aderência de *primers* e revestimentos subsequentes (RABINOVICH, 2010).

Esse processo é comumente utilizado em várias instâncias na indústria, especialmente na aeronáutica. Nela, a aplicação ocorre diretamente em fuselagens e componentes estruturais mais expostos nas etapas de preparação de superfícies, para posteriormente serem pintados ou receberem aplicações de adesivos estruturais. Para deduzir a eficácia do processo, vários fatores são levados em conta: segundo Davis (2001), a composição química da liga de alumínio, o controle de tempo e temperatura de reação e da limpeza da superfície são parâmetros fundamentais para garantir a durabilidade e o desempenho mecânico.

A literatura também indica a existência de diferentes tipos de alodine, que oferecem características distintas quanto a sua aplicação. A formulação do Alodine 1200 e o Alodine 1600, por exemplo, são desenvolvidos para proporcionar alta resistência a corrosão e a compatibilidade com *primers* epóxi (RABINOVICH, 2010), na Tabela 1 é possível analisar a sua aplicação em diversos setores da indústria.

Tabela 1 – Classificação e Aplicações das Ligas de Alumínio.

Série	Composição Química	Aplicações principais
1XXX	Al comercialmente puro	Contatos elétricos, Alclad.
2XXX	Al-Cu e Al-Cu-Mg	Indústria aeronáutica.
3XXX	Al-Mn e Al-Mn-Mg	Latas de bebidas, painéis.
4XXX	Al-Si	Metal de adição para soldas. Pistões de motores
5XXX	Al-Mg	Aplicações náuticas (navios e barcos)
6XXX	Al-Mg-Si	Perfis arquitetônicos, componentes automotivos.
7XXX	Al-Zn e Al-Zn-Mg	Indústria aeronáutica.
8XXX	Outras ligas (Al-Li, Al-Fe...)	Várias.

Fonte: The aluminum Association, 1998.

É relevante notar que a camada química formada por este tratamento não altera significativamente as dimensões do componente. Este atributo atua como um critério decisivo na escolha do processo, sendo essencial para a integridade de peças críticas de fuselagem e superfícies estruturais. Além disso, a aplicação adequada da alodinação reduz significativamente o risco de corrosão intergranular e corrosão pontual, que são problemas recorrentes em ligas aeronáuticas de alta resistência, como as séries 2024-T3 e 7075-T6 (DAVIS, 2001).

Os avanços recentes no tratamento de superfícies demonstram que as alternativas *Cr-Free*, especialmente os revestimentos baseados em zircônio (Zr) e titânio (Ti), oferecem uma solução ambientalmente mais segura e, em diversos casos, proporcionam desempenho igual ou superior aos tratamentos clássicos à base de cromo (Cr) (BOUALI et al., 2022). O efeito visual desse tratamento na superfície é visivelmente melhor, conforme exemplificado na Figura 1, que ilustra a mudança de coloração e o aspecto da peça.

Nesse contexto, analisando o estudo de Zhang et al. (2018), é possível concluir que um revestimento de conversão baseado em Ti-Zr depositado em ligas de alumínio 5052 demonstrou excelente resistência à corrosão, evidenciada por uma corrente de corrosão significativamente reduzida após o tratamento (ZHANG, et al., 2018). Esse tipo de sistema *Cr-Free* se mostra altamente promissor para aplicações aeronáuticas por estabelecer uma camada protetora densa e quimicamente estável, além de ser plenamente compatível com a aplicação de *primers* e por não induzir alterações geométricas críticas aos componentes.

Figura 1 – Material após a alodinação x Material antes da alodinação.



Fonte: Best Technology Inc., 2025.

2.2. Aplicações em reparos estruturais aeronáuticos

Quando considerado o contexto aeronáutico, esse processo é aplicado em regiões onde há remoção de material danificado, preparação para patch metálico ou adesivos estruturais. A alodinação age, segundo Rabinovich (2010), como componente principal para uniformizar as superfícies do alumínio e promover maior durabilidade do reparo. Em comparação com métodos tradicionais de limpeza mecânica ou jateamento abrasivo, há vantagens como proteção imediata contra corrosão e menor risco de dano superficial à peça (DAVIS, 2001). Analisando esse mesmo aspecto com o *Cr-Free*, os resultados também são promissores: Rosa, Pinheiro e Ferreira (2021) investigaram como o pH e a concentração de soluções à base de zircônio influenciam a deposição da camada de conversão em alumínio 7075-T6, constatando que parâmetros bem controlados resultam em filmes uniformes e altamente resistentes à corrosão. Esses estudos indicam que revestimentos Zr-baseados podem ser aplicados com eficiência em reparos aeronáuticos, promovendo durabilidade e aderência compatível com requisitos estruturais.

O processo de alodinação se inicia com a limpeza rigorosa da superfície do alumínio, seguida pela imersão da peça em um tanque de conversão química, como mostra a Figura 2. A natureza dos limpadores utilizados (alcalinos ou ácidos) depende do tipo de tratamento desejado (Tipo 1 ou Tipo 2). O tempo de processamento é variável conforme a peça, situando-se geralmente entre 10 e 30 minutos. Procedimentos modernos também enfatizam a importância de um pré-tratamento da superfície para otimizar a aderência do revestimento e, conseqüentemente, garantir uma proteção anticorrosiva superior.

Figura 2 – Tanque de conversão química de Alodine.



Fonte: Best Technology Inc., 2025.

Além disso, testes laboratoriais com formulações Zr/Ti demonstram viabilidade para uso real. As propriedades anticorrosivas dessas camadas *Cr-Free*, quando bem aplicadas, podem igualar ou até superar os tratamentos tradicionais com cromato, e ainda reduzir impactos ambientais e riscos à saúde associados ao cromo hexavalente. Esse potencial torna a alodinação moderna uma candidata forte para adoção nas oficinas MRO, especialmente nas manutenções recomendadas de fuselagem e painéis estruturais.

2.3. Normas e procedimentos de aplicação da alodinação

Assim como todo processo industrial, a aplicação da alodinação em componentes aeronáuticos segue protocolos rigorosos de preparação, conversão química e pós-tratamento. O processo envolve limpeza da superfície para remoção de óxidos e contaminantes, imersão controlada em solução de conversão e secagem adequada antes da aplicação de primers ou adesivos (RABINOVICH, 2010). Quando corretamente executado, o tratamento melhora significativamente a resistência à corrosão de ligas como 2024-T3 e 7075-T6 e aumenta a aderência de revestimentos subsequentes (DAVIS, 2001).

Normas internacionais também são aplicadas, como a ASTM B449, que especifica revestimentos de cromato, e a ASTM B921, direcionada a revestimentos de conversão não-cromados. No setor aeroespacial, as especificações AMS 2473 e AMS 2474 definem requisitos para conversão química em ligas de alumínio com foco em resistência à corrosão, adesão e compatibilidade com pintura. Para processos industriais gerais, a ISO 8081 descreve requisitos para conversão química em ligas de alumínio. Além disso, fabricantes aeronáuticos utilizam normas próprias, como a BAC 5719 (Boeing), que se baseia diretamente nos requisitos da MIL-DTL-5541 (*Chemical conversion coatings on aluminum and aluminum alloys*). Nas Figuras 3 e 4 a seguir, é possível analisar algumas normas que padronizam o processo.

Com a expansão dos processos *Cr-Free* baseados em Zr e Ti, o controle de pH, tempo, temperatura e aditivos torna-se ainda mais importante para garantir uniformidade, estabilidade e compatibilidade com reparos aeronáuticos, trazendo desempenho comparável aos tratamentos com cromato, alinhando segurança operacional, durabilidade e requisitos ambientais.

Figura 3 – Normas e especificações para revestimento de conversão.

Padrão	Título / Descrição
MIL-DTL-5541	Revestimentos de conversão química de acordo com as especificações militares para alumínio e ligas de alumínio. - A especificação mais comumente usada para revestimentos de película química - Substituiu a norma MIL-C-5541 em 2006.
MIL-DTL-81706	Especificação militar, materiais de conversão química para revestimento de alumínio e ligas de alumínio. - Relacionado com MIL-DTL-5541 - A norma MIL-DTL-81706 destina-se principalmente aos fabricantes dos produtos químicos utilizados em revestimentos de conversão química, enquanto a MIL-DTL-5541 é voltada para aqueles que utilizam e aplicam o revestimento.
ASTM B449	Especificação padrão para cromatos em alumínio Semelhante, mas não idêntico ao MIL-DTL-5541, Tipo 1.
ASTM B921	Especificação padrão para revestimentos de conversão de cromo não hexavalente em alumínio e ligas de alumínio. Similar, mas não idêntico ao MIL-DTL-5541, Tipo 2.
AMS 2473	Tratamento químico de película para ligas de alumínio, revestimento de uso geral Especificação aeroespacial, similar à MIL-DTL-5541 Classe 1A.
AMS 2474	Tratamento químico para ligas de alumínio, revestimento de baixa resistência elétrica Especificação aeroespacial, similar à MIL-DTL-5541 Classe 3.
ISO 8081	Processo aeroespacial, Revestimento de conversão química para ligas de alumínio, Uso geral Descreve os requisitos para a produção e teste de revestimentos.
BAC 5719	Revestimentos de conversão química para alumínio e ligas de alumínio Especificação de processo da Boeing, similar, mas não idêntica à MIL-DTL-5541.

Fonte: Best Technology Inc., 2025.

Figura 4 – Tipos e classes para revestimentos de conversão de cromo.

Padrão MIL-DTL-5541	Tipo 1	Tipo 2
Cromatos	Cromato hexavalente	Cromato isento de hexano (cromato trivalente)
Classe 1A	Proteção máxima contra corrosão	Proteção máxima contra corrosão
Classe 3	Melhoria da condutividade elétrica com proteção contra corrosão.	Melhoria da condutividade elétrica com proteção contra corrosão.

Fonte: Best Technology Inc., 2025.

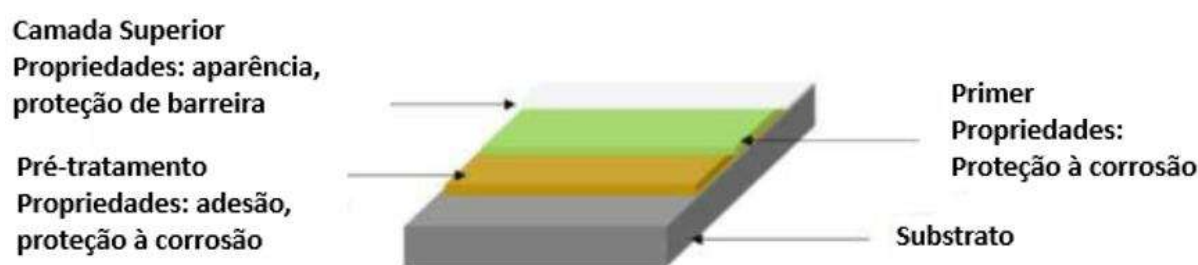
2.4. Estudos recentes sobre conversão química *Cr-Free*

A necessidade premente da indústria aeronáutica de substituir processos tradicionais como o Alodine 1200, que utiliza compostos tóxicos à base de cromo hexavalente (Cr-VI) e, portanto, é restrito por regulamentações ambientais, elevou a relevância do desenvolvimento de revestimentos de conversão *Cr-Free* (cromo-livre).

Como alternativa viável e sustentável, novas opções de tratamento que incorporam

elementos como zircônio (Zr), titânio (Ti), ítrio (Y) e cério (Ce), por exemplo, apresentam um menor impacto à natureza e, simultaneamente, demonstram um desempenho anticorrosivo comparável ou superior. Tais avanços posicionam os revestimentos *Cr-Free* como a próxima geração de pré-tratamento de superfície para reparos estruturais importância desse pré-tratamento na hierarquia da proteção estrutural pode ser visualizada na Figura 5, que ilustra o posicionamento da camada de conversão (Pré-tratamento) entre o substrato e as camadas de *primer* e *top coat*.

Figura 5– Ilustração esquemática de um sistema de revestimento para proteção contra corrosão em estruturas de aeronaves.



Fonte: Bouali, S. et al. 2022.

Os sistemas de conversão *Cr-Free* baseados em Zr/Ti formam uma nanoestrutura rica em óxidos metálicos densos e estáveis. Segundo Bouali et al. (2022), essa estrutura é capaz de reduzir a corrente de corrosão em ligas aeronáuticas críticas, como 2024-T3 e 7075-T6. Além disso, esses revestimentos promovem a criação de ligações covalentes ou iônicas entre as moléculas do revestimento e as moléculas da superfície nos primers epóxi, apresentando aderência equivalente ou superior aos tratamentos tradicionais contendo Cr (VI).

Contudo, Rosa, Pinheiro e Ferreira (2021) destacam que a eficiência das conversões à base de Zr é altamente sensível a parâmetros operacionais como pH, concentração da solução

e tempo de imersão. Os experimentos demonstram que o controle rigoroso de pH levemente ácido e de concentrações moderadas resulta em camadas mais homogêneas e resistentes, capazes de suportar ambientes corrosivos simulados. Essa sensibilidade reforça a necessidade de controle rigoroso dos parâmetros em oficinas de Manutenção, Reparo e Revisão (MROs), especialmente quando o tratamento é aplicado em reparos estruturais. Estudos complementares, como os de Zhang, et al. (2018), consolidam que camadas de conversão Ti–Zr proporcionam simultaneamente proteção anticorrosiva e excelente compatibilidade com revestimentos subsequentes (como *primers* epóxi e selantes estruturais). A formação da camada depende de reações de hidrólise e precipitação que criam um filme fino, estável e quimicamente aderente ao substrato. Tais evidências reforçam que os sistemas *Cr-Free* não se configuram apenas como substitutos ambientais, mas sim como alternativas tecnicamente competitivas que podem elevar a confiabilidade e a durabilidade dos reparos aeronáuticos. Assim, os avanços recentes na área de conversões químicas livres de cromo (*Cr-Free*) indicam uma crescente inevitável de transição tecnológica e sustentável dentro da aviação. Com normas ambientais cada vez mais restritivas e a necessidade de processos mais seguros, a totalidade dos estudos atuais demonstra que revestimentos baseados em Zr/Ti representam soluções viáveis e robustas para o futuro do tratamento de superfícies aeronáuticas, oferecendo o equilíbrio ideal entre desempenho técnico, sustentabilidade e aplicabilidade prática.

2.5. Relevância do estudo e análise da substituição do alodine 1200 por conversões *Cr-Free*

A substituição dos tratamentos à base de cromo hexavalente (Cr(VI)), como o Alodine 1200, por sistemas *Cr-Free* tornou-se uma prioridade global devido às severas restrições impostas por regulamentos internacionais, como o REACH/ECHA na Europa, que limitam o uso de Cr(VI) por seus conhecidos riscos ambientais e à saúde humana. Nesse cenário, o estudo aprofundado de revestimentos isentos de cromato é fundamental para validar sua viabilidade técnica e operacional na manutenção aeronáutica (MRO).

Revestimentos de conversão à base de zircônio (Zr) e titânio (Ti) oferecem vantagens significativas: eles eliminam substâncias cancerígenas, reduzem drasticamente os riscos ocupacionais e diminuem os custos associados ao descarte de resíduos. Além disso, esses processos mantêm a compatibilidade com *primers* epóxi, material muito utilizado na indústria aeronáutica. Pesquisas como a de Bouali et al. (2022) demonstram que, quando aplicados corretamente, esses sistemas podem alcançar um desempenho anticorrosivo comparável ou

superior ao do Alodine 1200.

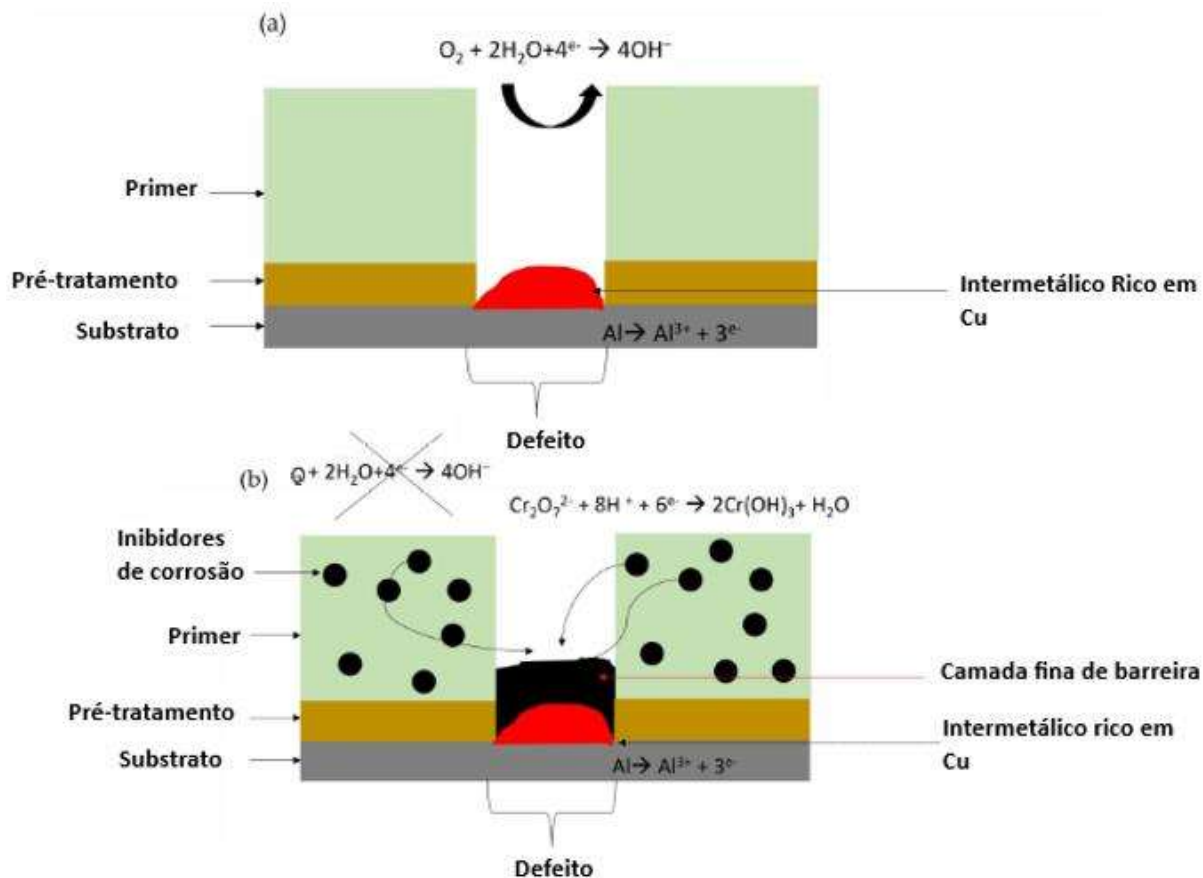
2.6. Processo de aplicação do tratamento de conversão química

As etapas controladas que visam formar camadas uniformes de conversão química, seguem um padrão rigoroso: inicia-se com a limpeza e desengraxe, seguida da desoxidação ácida que remove os óxidos instáveis, preparando para a reação de conversão (RABINOVICH, 2010).

Em seguida, a peça é imersa no banho de conversão onde íons Cr^{3+} , Zr^{4+} ou Ti^{4+} formando a película protetora, assim como mostra a figura 2, após esse processo realizam-se enxagues com água desmineralizada e secagem controlada.

Somente dessa forma, uma camada homogênea envolverá a peça, o que influencia diretamente a aderência do primer (Figura 6). A validação final consiste em uma inspeção visual e monitoramento químico do banho, assegurando o desempenho anticorrosivo.

Figura 6 – Esquema representando os mecanismos de corrosão (a) e proteção por Cr(VI) (b) de ligas de alumínio.



Fonte: Bouali, S. et al. 2022.

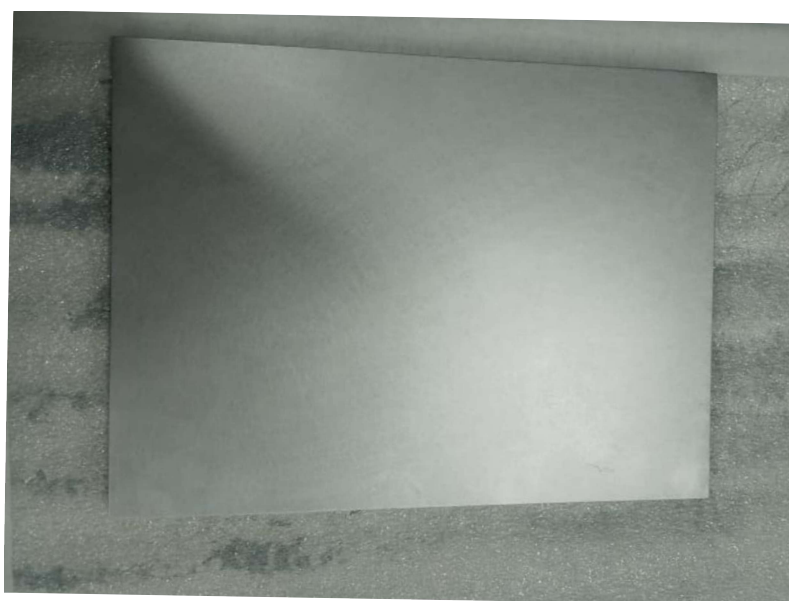
3. METODOLOGIA

A metodologia aplicada neste trabalho descreve o processo de fabricação, preparação e tratamento superficial de um painel estrutural aeronáutico, utilizando a técnica de alodinação localizada com cromo hexavalente. O procedimento foi realizado de acordo com os padrões de controle de qualidade empregados na indústria aeroespacial, seguindo as normas internas da Serco Engenharia, mediante autorização da empresa e respeitando integralmente as diretrizes de confidencialidade relacionadas aos dados e processos de clientes.

3.1. Materiais utilizados

Para a execução e validação experimental, foi utilizado um painel tipo sanduíche de alumínio aeronáutico com dimensões de 200 x 150 x 6,35 mm como corpo de prova para a realização das etapas de preparação superficial, alodinação e aplicação do revestimento primário, empregado como substrato do estudo, conforme apresentado na Figura 7. O tratamento de superfície foi realizado com a utilização da caneta aplicadora Bonderite M-CR 1132 Aero (Alodine 1132), seguida da aplicação de Primer Epóxi Verde BAC452 por meio de pistola pneumática. Também foram utilizados instrumentos de controle e preparação, incluindo termo-higrômetro digital, lixadeira orbital com manta Scotch-Brite verde, lixas granulometria #600, cronômetro digital e fita adesiva 3M destinada ao ensaio de aderência.

Figura 7 – Painel tipo sanduiche de alumínio aeronáutico utilizado como corpo de prova.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

máquina Router CNC 2030 utilizada durante a fabricação do corpo de prova. Esse equipamento foi responsável pela execução do processo de corte do painel, assegurando a precisão dimensional necessária para a realização dos ensaios e etapas subsequentes do estudo.

Figura 9 – Máquina Router CNC 2030 utilizada na fabricação do corpo de prova.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

3.3. Preparação da superfície

Na sequência, foi realizada a preparação superficial da peça, etapa fundamental para garantir a eficiência da reação química da alodinação. Inicialmente, efetuou-se a remoção de óxidos e irregularidades superficiais por meio de lixamento mecânico com lixadeira orbital e manta Scotch-Brite, promovendo a abertura do perfil de ancoragem necessário para o tratamento químico. Em seguida, foi realizada a limpeza fina da superfície utilizando pano úmido isento de fiapos, assegurando a remoção completa de contaminantes e resíduos provenientes do lixamento. A etapa de preparação superficial é apresentada na Figura 10, na qual pode ser observado o processo de lixamento mecânico realizado com lixadeira orbital e manta Scotch-Brite. Esse procedimento foi fundamental para a remoção de óxidos e impurezas superficiais, além da criação de um perfil adequado de ancoragem para o tratamento de conversão química aplicado posteriormente.

Figura 10 – Processo de preparação superficial do painel de alumínio aeronáutico.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

3.4. Aplicação técnica do alodine

A aplicação do Bonderite M-CR 1132 Aero foi conduzida em ambiente controlado quanto à temperatura e umidade relativa do ar, conforme registrado nas fichas de controle do processo. Durante a aplicação, foram registradas condições ambientais de 21,4 °C e umidade relativa de 64,4%. O procedimento iniciou-se com a ativação da caneta aplicadora, mediante pressão da ponta contra uma superfície de teste por um período de 15 a 30 segundos, até completa saturação do produto. A primeira aplicação ocorreu entre 09h48 e 09h55, sendo executada com sobreposição aproximada de 50% entre os traços, visando garantir uniformidade da camada de conversão. Após um intervalo de reação química de cinco minutos, foi realizada a segunda aplicação entre 10h00 e 10h05, desta vez em direção cruzada a 90°, assegurando maior integridade e homogeneidade da camada protetiva formada. A Figura 11

apresenta a aplicação do Bonderite M-CR 1132 Aero por meio de caneta aplicadora, técnica empregada para a realização do tratamento localizado de conversão química. O método permite o reparo de áreas específicas da estrutura aeronáutica, garantindo a formação uniforme da camada protetiva e o restabelecimento da proteção anticorrosiva da superfície tratada.

Figura 11 – Aplicação localizada do Bonderite M-CR 1132 Aero no painel de alumínio.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

3.5. Aplicação técnica do revestimento primário

Posteriormente, foi aplicado o revestimento primário utilizando Primer Epóxi Verde BAC452 Tipo II. O processo contemplou o controle de rastreabilidade dos lotes utilizados, bem como a preparação adequada da mistura, que apresentou viscosidade correspondente a um tempo de escoamento de 15,0 segundos. A aplicação foi realizada com pressão de 30 PSI, sob temperatura ambiente de 25,9 °C e umidade relativa de 50,2%. O sistema de pintura respeitou intervalo de flash-off de 15 minutos entre etapas, secagem ao toque de aproximadamente duas horas e cura total prevista para sete dias em temperatura ambiente. A aplicação do revestimento primário foi realizada em cabine de pintura utilizando pistola de pulverização convencional, respeitando os parâmetros de processo previamente estabelecidos. Conforme apresentado na Figura 12, a deposição do primer epóxi verde foi executada de maneira uniforme sobre a superfície do componente, garantindo a formação da camada de proteção necessária para as etapas subsequentes do sistema de pintura.

Figura 12 – Aplicação do *primer*.

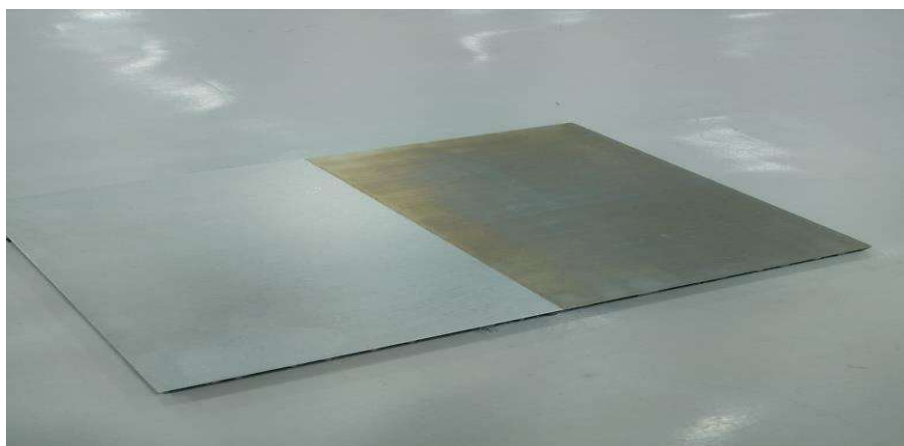


Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

3.6. Inspeção de qualidade e validação

A etapa final da metodologia consistiu na inspeção de qualidade e validação do sistema aplicado. Inicialmente, realizou-se inspeção visual da superfície tratada, considerando como critério de aceitação a formação de um filme contínuo, uniforme, apresentando coloração variando entre dourado claro e castanho dourado, sem presença de estrias, falhas ou áreas descobertas. O resultado da inspeção visual pode ser observado na Figura 13, que apresenta o corpo de prova após a aplicação do tratamento de conversão química. Observa-se a formação de uma camada uniforme sobre a superfície tratada, evidenciada pela coloração característica do filme de conversão, indicando que o processo foi executado adequadamente e sem a presença de descontinuidades ou falhas visíveis.

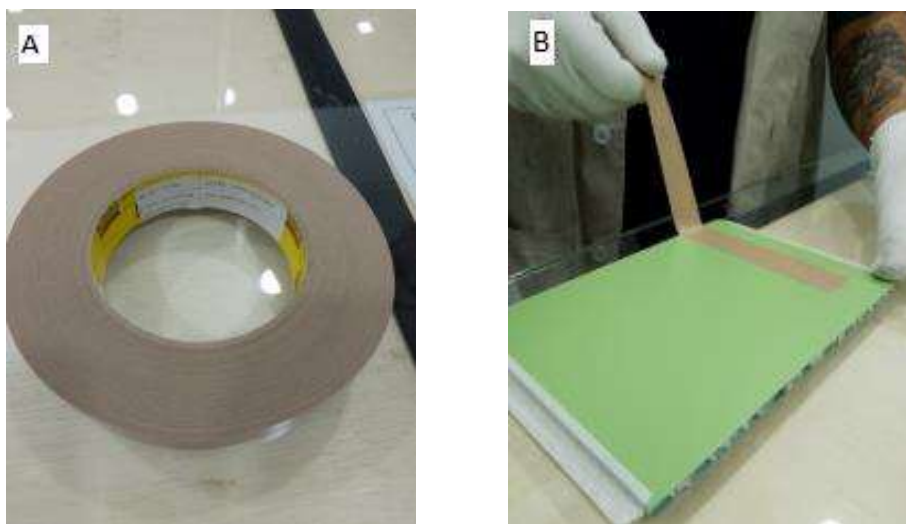
Figura 13 – Corpo de prova após a aplicação do tratamento superficial.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Em seguida, foi executado o ensaio de aderência do tipo Tape Test sobre o sistema completo composto pela camada de Alodine e pelo primer epóxi, utilizando fita adesiva 3M. A validação técnica foi confirmada pela ausência de destacamento do revestimento, demonstrando elevada eficiência da ancoragem química promovida pelo tratamento superficial com cromo hexavalente. A realização do ensaio de aderência é apresentada na Figura 14. Na Figura 14(A) é apresentada a fita adesiva 3M utilizada no procedimento experimental, enquanto a Figura 14(B) mostra a execução do ensaio Tape Test sobre a superfície revestida. O ensaio teve como finalidade avaliar a aderência entre o substrato tratado, a camada de conversão química e o primer epóxi aplicado.

Figura 14 - Ensaio de aderência (Tape Test) (B) realizado com fita adesiva 3M
(A)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos demonstraram a eficácia da integração entre os processos digitais de manufatura, incluindo CAD, CAM e usinagem CNC, associados aos tratamentos químicos manuais de precisão empregados na manutenção aeronáutica. A análise experimental permitiu verificar a eficiência da metodologia aplicada quanto à proteção superficial, aderência do revestimento e qualidade estrutural do painel produzido.

4.1. Inspeção de qualidade e validação

O painel sanduiche de alumínio apresentou elevada conformidade dimensional após o processo de usinagem na Router CNC 2030. As bordas permaneceram estruturalmente íntegras, sem ocorrência de esmagamento do núcleo *honeycomb* ou formação excessiva de rebarbas nas chapas externas. Esse resultado confirma que os parâmetros de corte definidos no *Mastercam* foram adequados para a espessura de 6,35 mm do material utilizado, assegurando precisão geométrica e qualidade do acabamento superficial.

4.2. Eficácia da alodinação (*Bonderite M-CR 1132 Aero*)

A aplicação localizada do Bonderite M-CR 1132 Aero por meio da caneta aplicadora resultou na formação de uma camada de conversão uniforme e contínua. Após o período de cura, a inspeção visual evidenciou a presença de um filme iridescente com tonalidade castanho dourado, característica típica da adequada reação química do cromo hexavalente com o substrato de alumínio. Observou-se ainda elevada uniformidade superficial, sendo que a técnica de sobreposição de 50% eliminou a presença de falhas, pontos vazios ou estrias, garantindo cobertura integral da área retrabalhada e restabelecimento da proteção anticorrosiva e da condutividade elétrica superficial.

4.3. Análise das condições de processamento

A análise das condições de processamento demonstrou que o monitoramento contínuo das variáveis ambientais contribuiu diretamente para a estabilidade química dos materiais empregados. Mesmo com variações de temperatura entre 21,4 °C e 25,9 °C, o processo manteve desempenho satisfatório. A viscosidade do primer, registrada em 15,0 segundos, mostrou-se adequada para obtenção de um filme homogêneo, livre de defeitos como porosidade, escorrimentos ou irregularidades superficiais, fatores essenciais para garantir proteção anticorrosiva e qualidade aerodinâmica em aplicações aeronáuticas.

4.4. Teste de aderência (Validação final)

O ensaio de aderência realizado com fita adesiva 3M representou uma das etapas mais importantes para validação do sistema de revestimento aplicado. Após a remoção da fita, não foram observados destacamentos do primer ou da camada de Alodine, demonstrando elevada eficiência da aderência entre o metal base e o sistema de pintura. Conforme os critérios estabelecidos pela ASTM International ASTM D3359, o resultado obtido foi classificado como Grau 5B, correspondente a 0% de remoção do revestimento na área ensaiada. Esse desempenho comprova que o Bonderite M-CR 1132 Aero cumpriu adequadamente sua função como ponte de aderência entre o substrato metálico e o revestimento protetivo, validando a metodologia aplicada para utilização em reparos aeronáuticos realizados em linha de manutenção ou ambiente de hangar.

5. CONCLUSÃO

De modo geral, os resultados obtidos durante a execução prática realizada na Serco Engenharia demonstraram que, mesmo se tratando de um processo manual e localizado, a padronização operacional por meio de Instruções de Trabalho e o rigoroso controle das variáveis ambientais permitem alcançar resultados equivalentes aos obtidos em processos industriais por imersão. Além disso, o método apresentou vantagens relacionadas à agilidade de execução, redução da geração de resíduos químicos e maior praticidade para aplicação em reparos localizados na indústria aeronáutica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM B117: Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus**. West Conshohocken: ASTM International, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM B449: Standard Specification for Chromate Coatings on Aluminum Alloys**. West Conshohocken: ASTM International, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM B921: Standard Specification for Non-Chromate Conversion Coatings on Aluminum and Aluminum Alloys**. West Conshohocken: ASTM International, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D3359: Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test**. West Conshohocken: ASTM International, 2017.

BEST TECHNOLOGY, INC. **What is Alodine / Chem Film / Chromate Conversion**. Disponível em: <https://www.besttechnologyinc.com/surface-finishing/what-is-alodine-chem-film-chromate-conversion-coating/>. Acesso em: 17 nov. 2025.

BOEING COMPANY. **BAC 5719: Chemical Conversion Coatings for Aluminum and Aluminum Alloys**. Seattle: Boeing, 2024.

BOUALI, M.; PELTIER, F.; THIERRY, D. Review of Cr-Free Coatings for the Corrosion Protection of Aluminum Aerospace Alloys. *Coatings*, Basel, v. 12, n. 4, art. 518, 2022.

DAVIS, J. R. **Aluminum and Aluminum Alloys**. Materials Park: ASM International, 2001.

RABINOVICH, E. **Corrosion and Surface Protection of Aluminum Alloys**. New York: Springer, 2010.

ROSAA, G. C.; PINHEIRO, J. S.; FERREIRA, J. Z. Influence of pH and Concentration on Zirconium-Based Coating on T6-7075 Aluminum Alloy. In: **INTERNATIONAL CORROSION CONGRESS**, Anais [...], 2021.

THE ALUMINUM ASSOCIATION, Washington, D.C 20006-December 1998.

UNITED STATES DEPARTMENT OF DEFENSE. **MIL-DTL-5541F: Chemical Conversion Coatings on Aluminum and Aluminum Alloys**. Washington, DC: Department of Defense (2006a).

UNITED STATES DEPARTMENT OF DEFENSE. **MIL-DTL-81706B: Chemical Conversion Materials for Coating Aluminum and Aluminum Alloys**. Washington, DC: Department of Defense (2006b).

ZHANG, H.; ZHAO, X.; TANG, Y. Preparation of Ti–Zr-Based Conversion Coating on 5052 Aluminum Alloy, and Its Corrosion Resistance and Antifouling Performance. *Coatings*, Basel, v. 8, n. 11, art. 397, 2018.