

Guia para empresas de Tratamento de Superfície Metálica



1ª Edição

Junho de 2026

Realização:

Comissão Técnica de Metalurgia do CRQ-SP



Guia para empresas de Tratamento de Superfície Metálica

1ª Edição

Junho de 2026

Realização: Comissão Técnica de Metalurgia do CRQ-SP

É proibida a reprodução e comercialização desta obra. Todos os direitos reservados A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610 DE 19/02/1998).

CONSELHO REGIONAL DE QUÍMICA

Rua Oscar Freire, 2039 – Pinheiros

CEP: 05409-011

São Paulo/SP

www.crqsp.org.br

comissoes@crqsp.org.br

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)**

Guia para empresas de tratamento de superfície
metálica [livro eletrônico] / realização
Comissão Técnica de Metalurgia do CRQ-SP. --
1. ed. -- São Paulo : CRQ-SP, 2026.

Vários autores.

Vários colaboradores.

Bibliografia.

ISBN 978-65-979835-1-3

1. Bijuterias 2. Metais 3. Metalurgia 4. Química
I. CRQ-SP, Comissão Técnica de Metalurgia do.

26-362717.0

CDD-671.52

Índices para catálogo sistemático:

1. Processos e metalurgia : Tecnologia 671.52

Henrique Ribeiro Soares – Bibliotecário – CRB-8/9314

A Comissão Técnica de Metalurgia do CRQ-SP tem grande orgulho de disponibilizar a primeira versão do Guia para Empresas de Tratamento de Superfície. Ele reúne informações técnicas e de segurança sobre os principais processos de tratamento de superfícies metálicas, amplamente utilizados em diferentes setores industriais. O conteúdo foi organizado de forma didática, buscando auxiliar estudantes que têm interesse na área e profissionais da química habilitados que já atuam no segmento.

Embora o material apresente uma visão abrangente dos processos mais relevantes, alguns temas não foram incluídos ou aprofundados nesta edição, a fim de manter o guia em um formato mais conciso e acessível. Desta forma, este trabalho não pretende esgotar o assunto, mas oferecer uma base de consulta e estudo que possa contribuir para a compreensão dos fundamentos e práticas do tratamento de superfícies.

Espera-se que este guia sirva como instrumento de apoio para o aprendizado de profissionais da química, a prática profissional e o aprofundamento em temas relacionados à química de superfícies.

Autores

Carlos Eduardo da Silva
Célia Aparecida Lino dos Santos
Diego Duarte Dantas
Elizete Ribeiro Fialho
Eurides de Sousa Jesus
Izabel Roberta da Silva
Patrícia Cristiane da Silva
Robson Rodrigues Coelho
Thiago Munhoz Santos

Colaboradores

Guilherme Frederico Bernardo Lenz e Silva
Gustavo Estrela da Silva

Gerência de Relações Institucionais do CRQ-SP

Aislan Renato Balza – Gerente
Luciana Bragil Mamede – Coordenadora
Mari Menda – Jornalista

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	7
2.	PRÉ-TRATAMENTO DE SUPERFÍCIES METÁLICAS.....	10
	2.1 Desengraxe	11
	2.2 Lavagens	12
	2.3 Decapagem	12
	2.4 Ativação ácida/neutralização	13
3.	FABRICAÇÃO DE BIJUTERIAS FOLHEADAS.....	15
	3.1 Fundição e ligas metálicas	16
	3.2 Fundição por cera perdida.....	19
	3.3 Retificador de corrente	20
	3.3.1 Ânodos e cátodos	21
	3.4 Linha galvânica para bijuterias e adornos folheados	22
	3.4.1 Cobre alcalino	23
	3.4.2 Cobre Ácido	24
	3.4.3 Banho de ouro — douração	25
	3.4.4 Banho de prata – prateação	30
	3.4.5 Banho de ródio	31
	3.5 Controle de Qualidade e manutenção de eletrólitos	32
4.	BANHO DE ZINCO ELETROLÍTICO.....	34
	4.1 Materiais tratáveis e campos de aplicação.....	34
	4.2 Tipos de processos de zinco e ligas	35
	4.3 Etapas do processo	37
	4.3.1 Fragilização por hidrogênio em aços de alta resistência.....	38
	4.3.2 Controle analítico e ensaios	39
5.	PASSIVAÇÃO	42
	5.1 Tipos de passivação	42
	5.2 Etapas do processo de passivação	44
	5.3 Parâmetros operacionais	45
	5.3.1 Controle de processo.....	46
6.	GALVANIZAÇÃO/ZINCAGEM A FOGO	49
	6.1 Fluxo (fluxagem)	49
	6.2 Banho de zinco fundido.....	50

6.3	Inspeção.....	53
7.	FOSFATIZAÇÃO	54
7.1	Tipos de fosfatização	55
7.2	Etapas do processo de fosfatização	58
7.2.1	Parâmetros operacionais.....	58
7.2.2	Controle químico do banho.....	60
7.2.3	Cinética e formação de cristais.....	62
7.3	Aplicações industriais	63
7.4	Ensaio de revestimento	64
8.	ANODIZAÇÃO DE LIGAS DE ALUMÍNIO	66
8.1	Tipos de ligas.....	68
8.2	Etapas do processo	70
8.2.1	Banho ácido eletrolítico.....	71
8.2.2	Coloração.....	73
8.2.3	Selagem	74
9.	SAÚDE E SEGURANÇA OCUPACIONAL DO TRABALHADOR	76
9.1	Equipamentos de Proteção Individual (EPI) e Equipamentos de Proteção Coletiva (EPC)	76
9.2	Procedimentos e condutas seguras	80
9.3	Vigilância médica e emergências	81
9.4	Aspectos previdenciários	83
10.	CONSTITUIÇÃO DA EMPRESA E LICENCIAMENTOS.....	85
10.1	Definição dos processos e escopo técnico	85
10.2.	Localização do empreendimento	86
10.3.	Constituição legal da empresa	86
10.4.	Licenciamento ambiental	87
10.5	Alvará de funcionamento	88
10.6	Auto de Vistoria do Corpo de Bombeiros (AVCB).....	88
10.7	Cadastro Técnico Federal do IBAMA	89
10.8	Licença para produtos controlados	89
10.9	Ficha de Dados de Segurança - FDS.....	89
11.	REGULARIZAÇÃO JUNTO AO CRQ-SP.....	91
11.1	Abrangência da Responsabilidade Técnica	91
12.	TRATAMENTO DE EFLUENTES	93

12.1	Etapas do processo de tratamento	94
12.2	Geração, classificação e destinação do lodo	98
12.3	Potencial de reaproveitamento de resíduos.....	100
13.	GLOSSÁRIO	101
14.	REFERÊNCIAS	103

1. INTRODUÇÃO

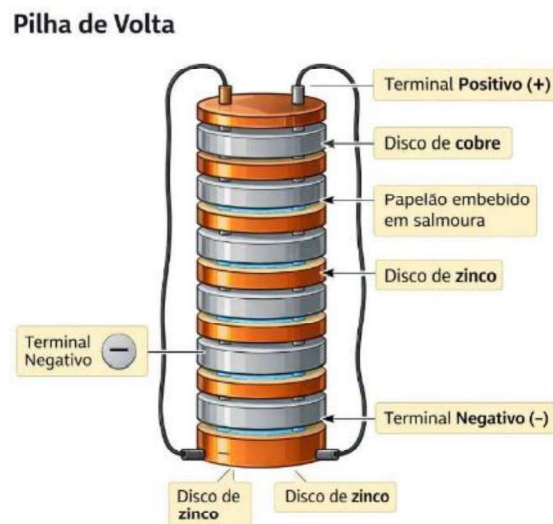
A galvanoplastia é um processo eletroquímico utilizado para depositar, de forma controlada, uma ou mais camadas metálicas sobre um material condutor. Esse recobrimento pode ter diferentes finalidades, como proteção contra corrosão, melhoria de propriedades mecânicas e elétricas ou acabamento estético. O processo baseia-se na eletrólise de soluções contendo íons metálicos, sob aplicação de corrente elétrica contínua utilizando-se um retificador, sendo também conhecido como eletrodeposição.

A história da galvanoplastia está diretamente ligada ao desenvolvimento da eletroquímica no final do século XVIII, período em que a eletricidade ainda era um fenômeno pouco compreendido.

Em 1780, Luigi Galvani observou contrações em músculos de rãs quando em contato com metais distintos. Embora tenha interpretado o fenômeno como “eletricidade animal”, sabe-se atualmente que ele resulta de diferenças de potencial eletroquímico entre metais em um meio condutor.

Poucos anos depois, Alessandro Volta demonstrou que a eletricidade era gerada pelo contato entre metais diferentes e desenvolveu, em 1800, a pilha voltaica (Figura 1) — o primeiro dispositivo capaz de fornecer corrente elétrica contínua de forma controlada, possibilitando avanços fundamentais na eletrodeposição.

Figura 1. Representações da pilha voltaica, primeiro gerador de corrente contínua



Fonte: Adaptado de Wikimedia Commons

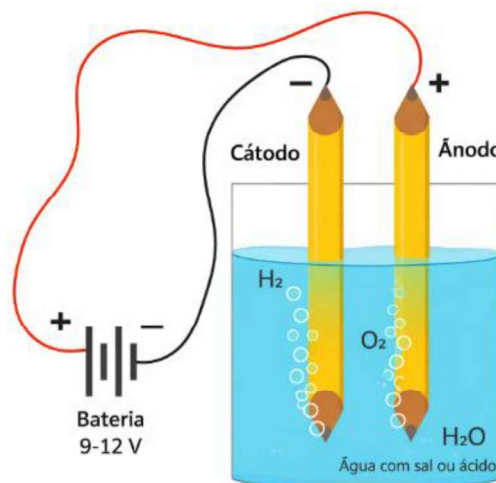
Em 1805, Luigi Brugnatelli realizou a primeira deposição eletroquímica documentada, utilizando corrente elétrica para recobrir objetos de prata com ouro. Apesar do caráter inovador, seus resultados tiveram circulação limitada à época, o que retardou a disseminação da técnica.

Antes da eletrodeposição, a aplicação de ouro era realizada por douração a fogo, baseada na amalgamação com mercúrio. Embora eficiente, esse método apresentava riscos severos à saúde devido à liberação de vapores tóxicos. A substituição por processos eletroquímicos representou um avanço importante, ainda que estes também envolvam substâncias perigosas que exigem controle rigoroso.

Nas décadas de 1820 e 1830, Michael Faraday estabeleceu as bases científicas da eletrólise, demonstrando que a massa de material depositado é proporcional à carga elétrica aplicada. Essas relações permanecem como fundamento da galvanoplastia moderna.

Faraday também introduziu termos fundamentais ainda utilizados, como eletrólito, eletrodo, ânodo, cátodo e íons (Figura 2).

Figura 2. Esquema simplificado de uma célula eletrolítica



Fonte: Adaptado de Wikimedia Commons

A galvanoplastia passou a ser aplicada industrialmente a partir da década de 1840. John Wright identificou que soluções contendo cianeto eram eficientes para a deposição de ouro e prata, sendo posteriormente aplicadas em escala industrial pelos irmãos Elkington.

Esse avanço marcou a consolidação da galvanoplastia como processo produtivo. No entanto, é importante destacar que compostos cianetados apresentam elevada toxicidade, sendo seu uso condicionado a rigorosos controles operacionais, ambientais e de segurança. Paralelamente, o

desenvolvimento de geradores de corrente contínua substituiu gradualmente as pilhas, proporcionando maior estabilidade aos processos industriais.

O uso do níquel como revestimento metálico ganhou destaque a partir da metade do século XIX, sendo rapidamente adotado como alternativa à prata em aplicações decorativas e funcionais. Sua popularização deve-se à combinação de boa resistência à corrosão, dureza superficial e custo relativamente acessível.

Os primeiros banhos de niquelagem foram desenvolvidos com base em sais de níquel, como sulfato de níquel e sais de amônio. Ao longo do tempo, melhorias sucessivas foram introduzidas, incluindo o uso de ácido bórico como agente tamponante e a otimização da dissolução anódica.

Um marco importante ocorreu no início do século XX com o desenvolvimento do chamado banho de níquel do tipo Watts, que apresenta composição baseada em sulfato de níquel, cloreto de níquel e ácido bórico. Esse sistema proporcionou maior estabilidade operacional e qualidade de depósito, tornando-se referência industrial até os dias atuais.

Ao longo do século XX e início do século XXI, a galvanoplastia evoluiu significativamente, acompanhando avanços tecnológicos e exigências ambientais. Entre os principais desenvolvimentos destacam-se:

- uso de retificadores mais estáveis
- automação de processos
- desenvolvimento de aditivos orgânicos
- redução de substâncias perigosas
- implantação de sistemas de tratamento de efluentes

Atualmente, a galvanoplastia é aplicada em diversos setores industriais, como indústria automotiva, eletroeletrônica, construção civil, joalheria e de dispositivos médicos.

Paralelamente, no início do século XX desenvolveu-se o processo de anodização, especialmente aplicado ao alumínio. Diferentemente da galvanoplastia, trata-se de um processo no qual o próprio metal é oxidado de forma controlada, formando uma camada de óxido protetora.

Esse tratamento proporciona maior resistência à corrosão, aumento da dureza superficial e possibilidade de acabamento decorativo, sendo amplamente utilizado em aplicações arquitetônicas, industriais e aeronáuticas.

2. PRÉ-TRATAMENTO DE SUPERFÍCIES METÁLICAS

O pré-tratamento é determinante para a aderência e o desempenho de revestimentos metálicos ou camadas de conversão e tem como finalidade remover contaminantes orgânicos, óxidos e filmes passivos, preparando a superfície para a nucleação uniforme do depósito. A eficiência dessas operações influencia diretamente a qualidade do revestimento, podendo afetar aderência, uniformidade, massa de camada e ocorrência de defeitos.

Em linhas industriais de tratamento ou galvanização, as operações são similares e realizadas em sequência de tanques contendo soluções intercaladas por etapas de lavagem (Tabela 1). Falhas em qualquer etapa comprometem a uniformidade do revestimento, a aderência e a estabilidade dos banhos e a qualidade de cada etapa condiciona o desempenho da etapa seguinte.

Tabela 1: Etapas típicas do pré-tratamento

Etapa	Objetivo	Observações principais
Desengraxe	Remover óleos, graxas, compostos de polimento, fluidos de corte e partículas finas	Pode ser químico, eletrolítico ou por ultrassom
Lavagens entre banhos químicos	Remover resíduos da etapa anterior, reduzir arraste entre banhos e evitar contaminação cruzada	Geralmente realizada em dois estágios. Podem incluir água desmineralizada em aplicações críticas
Decapagem	Remover óxidos metálicos, ferrugem e carepas	Realizada com soluções ácidas
Ativação/Neutralização	Neutralizar resíduos alcalinos e remover filmes passivos	Prepara a superfície para o depósito
Desoxidação ou <i>Desmut</i>	Remover óxidos de Alumínio ou resíduos de liga (Fe, Cu, Si)	Realiza a limpeza química para a próxima etapa, utilizado principalmente na anodização de alumínio
Abrilhantamento ou fosqueamento (para anodização de alumínio)	Finalidades estéticas para aumentar ou diminuir o reflexo da luz	A escolha dependerá da especificação desejada (peça fosca ou brilhante)

Fonte: Autor

2.1 Desengraxe

O desengraxe remove contaminantes orgânicos da superfície metálica, como óleos, graxas, agentes de proteção temporária e resíduos de polimento. Trata-se de uma etapa crítica, pois limpeza insuficiente compromete a aderência e a uniformidade das camadas subsequentes (Figura 3).

Figura 3– Comparação entre superfície com falha de desengraxe (direita) e superfície corretamente desengraxada (esquerda), com formação de filme d'água uniforme



Fonte: Gerado por Gemini (2026).

Os tipos de desengraxe são:

- **Químico (imersão):** soluções alcalinas, ácidas ou neutras que removem sujidades por meio de saponificação, emulsificação e dispersão.
- **Eletrolítico:** a peça atua como cátodo, ocorrendo desprendimento de hidrogênio (podendo haver fragilização), que auxilia na remoção da sujidade.
- **Ultrassônico:** utilizado para remover resíduos em peças de geometria complexa.

Sujidades que não possam ser removidas adequadamente por limpeza química devem ser eliminadas previamente por processos mecânicos, como jateamento abrasivo.

Os parâmetros usuais dos banhos são:

- **Banho ácido** (ácidos fosfóricos, sulfúrico ou glucônico): temperatura ambiente ou levemente aquecida.
- **Banho alcalino** (hidróxido de sódio, silicatos, carbonatos e outros): temperatura entre 40 e 80 °C.

Os banhos de desengraxe devem ter monitoramento de pH, temperatura, concentração da matéria-prima, teor de contaminantes (principalmente ferro) e aspecto visual do banho, sendo o tempo de tratamento variável conforme o nível de sujidade da superfície.

⚠ Nota de segurança: *Desengraxantes alcalinos concentrados são corrosivos e irritantes para pele, olhos e mucosas. É obrigatório o uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) adequados — luvas de borracha nitrílica ou neoprene, óculos de proteção ou face shield, avental impermeável — além da instalação de sistema de ventilação local exaustora sobre os tanques de trabalho. Para mais detalhes, consultar o capítulo "Saúde e Segurança Ocupacional do Trabalhador".*

2.2 Lavagens

As lavagens são realizadas entre as etapas para remover resíduos químicos e evitar contaminação cruzada entre banhos. A água deve apresentar boa qualidade, com baixo teor de íons metálicos e cloretos. Geralmente são realizadas em dois estágios:

- **Primeira lavagem:** é realizada em água parada, cuja função é reter a maior parte do arraste proveniente do banho anterior.
- **Segunda lavagem:** ocorre em água corrente ou em sistema cascata, permitindo a remoção mais eficiente dos resíduos remanescentes até a formação de um filme d'água uniforme sobre a superfície da peça.

⚠ Nota ambiental: *Toda água de lavagem que entra em contato com soluções contendo metais pesados ou cianetos deve ser encaminhada à sistema de tratamento de efluentes antes de qualquer descarte, em conformidade com a legislação ambiental vigente. Para mais detalhes, consultar os capítulos "Licenciamento Ambiental" e "Tratamento de Efluentes".*

2.3 Decapagem

A decapagem remove carepas de laminação, ferrugem e óxidos de ferro da superfície do aço ou ferro fundido. Os parâmetros normalmente utilizados são:

- **Ácido sulfúrico:** concentração entre 10 e 14%, operando em temperatura de 60–80 °C.
- **Ácido clorídrico:** concentração entre 14 e 16%, utilizado em temperatura ambiente.

Na prática industrial, a decapagem com ácido clorídrico a frio é a mais utilizada. Recomenda-se o uso de inibidores de corrosão para reduzir o ataque ao metal base, minimizar a perda de material e prolongar a vida útil do banho. Após a etapa de decapagem, realiza-se o enxágue com o objetivo de remover resíduos ácidos e sais formados durante a reação.

⚠ Nota de segurança: *A manipulação de ácidos requer atenção rigorosa. A diluição deve ser realizada sempre adicionando o ácido à água — nunca o inverso — para evitar reações violentas e respingos. Consultar obrigatoriamente a Ficha de Dados de Segurança (FDS) de cada produto e adotar os EPIs e procedimentos indicados nos capítulos de segurança deste guia.*

2.4 Ativação ácida/neutralização

A ativação ácida consiste na imersão das peças em soluções diluídas de ácidos (tipicamente sulfúrico, fosfórico ou acético, em concentrações de 5 a 10%).

No caso de fosfatização, o processo é chamado de “*refino*”, e, principalmente em sistemas de zinco tricatiônico, é utilizado composto à base de titânio, que promove a formação de núcleos homogêneos de cristalização. Essa etapa ocorre em diferentes pontos da linha galvânica, sempre intercalada por lavagens.

Seus objetivos são:

- neutralizar resíduos alcalinos provenientes do desengraxe
- remover finas camadas de óxidos
- ativar quimicamente a superfície para as camadas subsequentes

A sequência geral dos processos de Pré-Tratamentos consta na Tabela 2. Todos os banhos são intercalados por águas de lavagens e, no caso de anodização de alumínio, também é realizado o **fosqueamento (ácido ou alcalino) ou abrlhantamento químico**, seguido de desoxidação (desmut), com a função de remover contaminantes insolúveis das ligas, neutralizando resíduos, evitando reações indesejadas, garantindo que a superfície esteja quimicamente estável e pronta para receber a camada anódica, melhor esclarecido no capítulo 8 “Anodização”.

Tabela 2: Sequência geral de processo de Pré-Tratamento de Superfície Metálica

Tipo de tratamento de superfície	Desengraxe	Fosqueamento ou abrilhantamento e desoxidação/<i>Desmut</i>	Decapagem	Ativação/ neutralização	Banho específico
Fabricação de joias folheadas	1ª etapa	NA (não se aplica)	NA	2ª etapa	Cobreação, douração e prateação
Banho de zinco eletrolítico	1ª etapa	NA	2ª etapa	3ª etapa	Zincagem, passivação e selagem (opcional)
Anodização Fosca	1ª etapa	2ª etapa	NA	3ª etapa	Anodização, coloração (opcional) e selagem
Anodização Brilhante	1ª etapa	3ª etapa	NA	2ª etapa	Anodização, coloração (opcional) e selagem
Passivação	1ª etapa	NA	NA	2ª etapa	Passivação e selagem (opcional)
Galvanização a fogo	1ª etapa	NA	2ª etapa	NA	Fluxagem, zincagem a fogo e passivação
Fosfatização	1ª etapa	NA	2ª etapa	3ª etapa (refino)	Fosfatização e passivação (opcional)

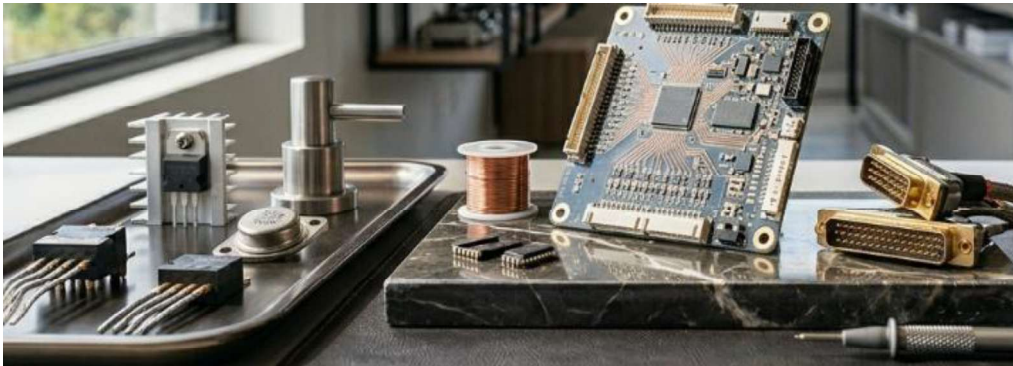
Fonte: Autor

3. FABRICAÇÃO DE BIJUTERIAS FOLHEADAS

Atualmente, as soluções eletrolíticas para a fabricação de bijuterias e artigos — popularmente chamadas de "banhos" — podem ser divididas, de forma geral, em dois segmentos: **técnico** e **decorativo**.

O segmento técnico prioriza propriedades físicas e químicas, como condutividade, resistência à corrosão e ao desgaste, sendo amplamente utilizado em conectores, contatos elétricos, placas de circuito impresso e componentes eletrônicos nos quais o desempenho funcional supera em importância o aspecto estético (Figura 4).

Figura 4 – Exemplos de peças técnicas com recobrimentos metálicos: conectores, contatos e terminais eletrônicos.



Fonte: Imagem gerada por: Gemini (2026)

O segmento decorativo dá ênfase ao aspecto visual — cor, brilho e textura — e à resistência ao atrito no uso cotidiano. Nesse segmento se inserem metais sanitários, acessórios para vestuário, relógios, armações de óculos, joias e bijuterias (Figura 5).

Figura 5 – Exemplos de peças decorativas



Fonte: Imagem gerada por: Gemini (2026)

Antes de descrever os banhos é essencial conhecer as ligas metálicas do substrato e os processos de fundição, pois o metal base influencia a eletrodeposição e o desempenho da bijuteria folheada.

3.1 Fundição e ligas metálicas

A fabricação de uma bijuteria inicia-se com o desenho da peça e o conhecimento da composição do substrato (metal base que receberá o recobrimento). Propriedades químicas, físicas e metalúrgicas do substrato — composição, estrutura, dureza, poros e inclusões — influenciam a preparação de superfície e a eletrodeposição. A falta de controle da composição e do estado superficial pode comprometer aderência, uniformidade e aspectos visuais finais, como cor, brilho e acabamento superficial.

A liga metálica é a mistura de dois ou mais metais (Tabela 3), podendo incluir elementos não metálicos, formando uma fase homogênea com propriedades distintas dos metais puros. Cada liga é projetada para atender requisitos como fluidez na fundição, usinabilidade, resistência mecânica e compatibilidade com a eletrodeposição e com as condições de uso da bijuteria.

Tabela 3: Composição típica de ligas metálicas utilizadas como substrato em bijuterias, joias e adornos.

Liga	Elementos principais	Porcentagem típica (%)
Latão	Cobre	55–70
	Zinco	30–45
	Chumbo, estanho, ferro, alumínio	≤ 2
Zamak 3	Zinco	95,0–96,0
	Alumínio	3,5–4,3
	Magnésio	0,03–0,06
	Cobre	≤ 0,25
Zamak 5	Zinco	94,2–96,0
	Alumínio	3,5–4,3
	Cobre	0,5–1,0
	Magnésio	0,03–0,06
Aço carbono	Ferro	98–99
	Carbono	0,05–0,25
	Manganês	0,3–1,0
	Silício, fósforo, enxofre	Traços
Aço inoxidável 304	Ferro	68–71
	Cromo	18–20
	Níquel	8–10,5
	Manganês, silício, carbono	≤ 0,08
Aço inoxidável 316L	Ferro	62–70
	Cromo	16,0–18,0
	Níquel	10,0–14,0
	Molibdênio	2,0–3,0
	Manganês	≤ 2,0
	Silício	≤ 1,0
	Carbono (definição do "L")	≤ 0,03
	Fósforo	≤ 0,045
Enxofre	≤ 0,030	
Alumínio 6063	Alumínio	97,5–99,0
	Magnésio	0,45–0,9
	Silício	0,2–0,6
Alumínio 3003	Alumínio	96,0–98,6
	Manganês	1,0–1,5
	Cobre	0,05–0,2
ABS (Acrlonitrila– Butadieno–Estireno)	Estireno	40–60
	Acrlonitrila	15–35
	Butadieno	5–30

Fonte: Adaptado de Callister & Rethwisch, 2016.

Esses materiais apresentam comportamentos distintos no tratamento de superfície: ligas de zinco (zamak) são sensíveis a ataques ácidos; aços inoxidáveis exigem ativação mais rigorosa e substratos poliméricos, como ABS, que requerem metalização química prévia, com ataque superficial controlado, sensibilização e ativação com paládio.

De maneira geral, existem três métodos principais para misturar metais: aquecimento e fusão; metalurgia do pó e implantação iônica. No segmento de adornos e joalheria, o método predominante é o aquecimento e fusão, por ser a forma mais direta com eficiência energética, controle de temperatura e operação em lotes de ligas em escala industrial e artesanal. Entre os tipos mais utilizados de fornos de fusão, destacam-se:

- **Forno de indução** — muito utilizado em fundições modernas; aquece a carga metálica por meio de campo eletromagnético, proporcionando aquecimento rápido e homogêneo, com boa repetibilidade e controle de temperatura (Figura 6).
- **Forno cadinho** — utiliza um cadinho aquecido por resistências elétricas, gás ou carvão; indicado para pequenas quantidades de metal, sendo bastante comum em joalherias e pequenas fundições (Figura 6).
- **Forno a arco elétrico** — mais comum em siderúrgicas; funde grandes volumes de metal por meio de arco elétrico entre eletrodos de grafite e a carga metálica.
- **Forno de resistência elétrica** — utiliza resistências metálicas ou cerâmicas para aquecimento; apresenta bom controle de temperatura e é indicado para fusões de menor escala.
- **Forno rotativo** — aplicado na fusão de sucatas, produção de ligas e alguns metais não ferrosos; permite o processamento de cargas heterogêneas.

Figura 6 – Exemplos esquemáticos de fornos de fusão: indução e cadinho, respectivamente



Fonte: Imagem gerada por: Gemini (2026)

O metal fundido será inserido no molde da peça ou adorno desejados, confeccionado pelo método da “cera perdida”.

3.2 Fundição por cera perdida

A fundição por cera perdida consiste na moldagem que cria peças metálicas de alta precisão e complexidade, amplamente utilizada na joalheria. Inicia-se com a construção do protótipo da peça em metal artesanalmente (matriz), a partir do qual são geradas réplicas em cera. Em seguida, a matriz é colocada em moldes de silicone para registrar sua impressão tridimensional. A cera é então injetada nesse molde, tomando a forma da peça, e a partir daí cria-se cópias perfeitas do protótipo (Figura 7).

Figura 7– Esquema de molde em silicone e cópia em cera para joalheria



Fonte: Imagens geradas por: Gemini (2026)

A próxima etapa é o acondicionamento da peça em cera em uma haste, formando assim a popular árvore de cera (Figura 8).

Figura 8: Representação esquemática de árvore de cera para fundição de joias.



Fonte: Imagem gerada por: Gemini (2026)

A árvore é acondicionada dentro de tubos, como os da foto abaixo, que serão preenchidos com gesso de fundição, priorizando a eliminação de bolhas de ar e o completo preenchimento de todos os espaços da peça

Ao contato com a alta temperatura, a cera residual é eliminada e a liga metálica fundida é vertida no molde, onde o metal ocupa seu volume. O cilindro é então submetido à rotação em centrífuga de fundição para garantir o preenchimento completo. Após resfriamento e solidificação, formam-se as peças metálicas, que são cortadas da árvore, e encaminhadas para os acabamentos, como lixar, desbastar, tamborear e polir, até que a superfície esteja extremamente brilhante e livre de qualquer saliência metálica. A seguir, as peças seguem para o processo eletrolítico de tratamento de superfície metálica.

3.3 Retificador de corrente

Os processos eletrolíticos requerem energia elétrica para que a eletrodeposição ocorra. O equipamento que converte corrente alternada (CA) em corrente contínua (CC) e permite ajustar tensão e corrente é denominado retificador (Figura 9). A função do retificador não se limita a fornecer energia elétrica: ele deve garantir corrente contínua estável, controle preciso da densidade de corrente (Ampere por decímetro ao quadrado - A/dm^2) e ajuste de tensão (Voltagem -V), possibilitando a repetibilidade

dos depósitos metálicos e a qualidade consistente ao longo da produção. O controle da densidade de corrente (A/dm²) é fundamental para evitar defeitos como queima e baixa cobertura.

Figura 9 – Retificador de corrente para linhas de tratamento de superfície metálica



Fonte: WG Retificadores (2026). Seu uso ilustrativo não constitui recomendação comercial.

3.3.1 Ânodos e cátodos

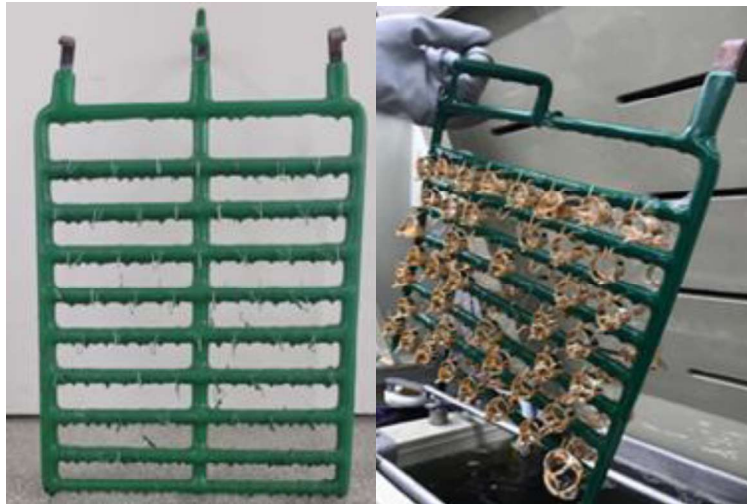
O **ânodo** é o eletrodo conectado ao polo positivo do retificador. Nele ocorre a oxidação (perda de elétrons), que pode resultar na dissolução controlada do metal, como ocorre com anodos solúveis de cobre ou prata, ou apenas na condução de corrente elétrica, como nos anodos insolúveis de aço inoxidável ou de óxidos metálicos mistos (MMO), compostos geralmente por titânio revestido com irídio, rutênio ou tântalo.

O **cátodo** é o eletrodo conectado ao polo negativo, representado pela peça a ser recoberta; é nele que ocorre a redução (ganho de elétrons) e, conseqüentemente, a deposição do metal de interesse.

*📄 Nota técnica: nos processos de tratamento de superfície de alumínio por **Anodização**, a designação dos eletrodos apresenta polaridade inversa, e a peça de alumínio a ser tratada atua como ânodo do sistema eletrolítico, enquanto o eletrodo auxiliar funciona como cátodo. Maiores detalhes são descritos no capítulo “Anodização”.*

O contato elétrico entre cátodo e solução do banho é promovido por dispositivos mecânicos específicos (Figura 10):

Figura 10: Representações de gancheiras, roletes e tambor rotativo para eletrodeposição de joias



Fonte: própria do autor e imagens técnicas de domínio público.

- **Gancheiras** — são estruturas metálicas revestidas com plastisol (resina de PVC), que garante isolamento elétrico nas áreas sem deposição. Possuem ganchos que sustentam as peças e asseguram contato elétrico, permitindo máxima exposição ao eletrólito sem contato entre elas.
- **Roletes** — utilizados para eletrodeposição de correntes, pulseiras, anéis e peças unidas por elos metálicos, permitindo a movimentação contínua e uniforme das peças no eletrólito.
- **Tambor rotativo** — No segmento de joias e bijuterias, o uso é limitado devido ao atrito entre peças, que pode causar riscos; ainda assim, é aplicado na eletrodeposição de componentes muito pequenos, como tarraxas e brincos.

A escolha do sistema de contato (gancheira, rolete ou tambor) influencia diretamente na uniformidade da deposição, no rendimento da produção e na qualidade visual e técnica do produto acabado. A geometria do contato influencia diretamente a distribuição de corrente.

3.4 Linha galvânica para bijuterias e adornos folheados

A linha galvânica é composta por uma sequência de tanques contendo soluções. O processo inicia-se com o **pré-tratamento** da superfície, que inclui desengraxe, lavagem e ativação ácida (descritos no Capítulo 2), sendo posteriormente conduzido às etapas subsequentes, conforme a seguir.

3.4.1 Cobre alcalino

O eletrólito de cobre alcalino tem por objetivo proteger o substrato e promover a aderência necessária para a camada de cobre ácido subsequente, que possui caráter ácido e seria agressiva ao substrato sem essa proteção intermediária. Características:

- utilizam-se anodos de cobre eletrolítico
- o depósito formado apresenta coloração avermelhada e aspecto fosco
- a solução eletrolítica é translúcida, de caráter alcalino, composta por hidróxido de sódio e sais

de cianeto de sódio e cobre

- trabalha em temperatura ambiente
- tensão de trabalho geralmente entre 2V e 3V
- densidade de corrente costuma ficar entre 0,5 A/dm² e 2,0 A/dm²
- utilizam-se anodos de cobre eletrolítico
- tempo de imersão entre 2 e 5 minutos

Essa camada é especialmente importante para substratos mais reativos, como o zamak, e atua como barreira protetora entre o metal base e as camadas de acabamento.

Após o banho de cobre alcalino é realizada a ativação ácida (conforme capítulo 2), intercalada por lavagens.

⚠ Nota de segurança crítica — Banhos cianetados: *o eletrólito de cobre alcalino contém cianetos. Em contato com ácidos, mesmo em baixas concentrações, soluções cianetadas liberam gás cianídrico (HCN), extremamente tóxico, com limite de exposição ocupacional de apenas 4,7 ppm. É absolutamente indispensável:*

- *manter rigoroso controle de pH da solução (pH ≥ 10,0, conforme recomendação do fornecedor)*
- *impedir qualquer mistura, mesmo acidental, de soluções ácidas com banhos cianetados ou com efluentes não tratados*
- *garantir ventilação local exaustora eficiente sobre o tanque*
- *providenciar treinamento específico para todos os operadores que manuseiam banhos cianetados*

- *manter procedimentos de emergência específicos para vazamentos e intoxicações afixados e acessíveis no local.*

3.4.2 Cobre Ácido

O eletrólito de cobre ácido exerce funções importantes na linha galvânica, pois promove o nivelamento da superfície ao preencher micro cavidades e corrigir defeitos do substrato. Além disso, proporciona brilho e uniformidade ao revestimento e forma uma camada condutiva homogênea, que favorece a aderência das camadas metálicas aplicadas posteriormente (Figura 11).

Figura 11 – Representação de peças em eletrodeposição de cobre ácido.



Fonte: bancos de imagens técnicos de domínio público.

A solução eletrolítica apresenta coloração azul característica e é composta por sulfato de cobre pentaidratado, ácido sulfúrico, pequenas quantidades de ácido clorídrico (fonte de íon cloreto, que atua como auxiliar de deposição) e aditivos orgânicos — abrillantadores, niveladores e umectantes — responsáveis pela obtenção de depósitos lisos, brilhantes e isentos de defeitos. Características:

- trabalha em temperatura entre 20° e 30°C
- tensão de trabalho entre 1V e 1,5V.
- densidade de corrente costuma ficar entre 2 A/dm² e 5 A/dm²
- utiliza-se anodos de cobre fosforoso (contendo de 0,04 a 0,06 de fósforo)
- tempo de imersão de 10 a 30 minutos

Após estas etapas, a bijuteria está com a superfície preparada para receber os banhos de ouro ou prata, conforme a especificação solicitada (peças douradas ou prateadas).

3.4.3 Banho de ouro — douração

Pré-ouro (*strike*)

O eletrólito de pré-ouro é uma camada intermediária, também denominado *strike* de ouro, é uma solução aquosa translúcida, de caráter alcalino e cianídrico, composta por:


- sais de cianeto de ouro e potássio
- tensoativos e umectantes
- trabalha em temperatura entre 70° e 75°C
- tensão de trabalho geralmente entre 3V e 5V
- densidade de corrente costuma ficar entre 2 A/dm² e 5 A/dm²
- utiliza-se anodos de MMO ou inox 304 / 316 L
- tempo de imersão: 30 a 60 segundos
- deposita camadas muito finas, de até 0,3 µm, de ouro praticamente puro (24 quilates)

Suas principais funções são selar a camada de cobre, impedindo sua migração, evitar *pittings*, manchas e escurecimento da superfície e promover aderência para camadas subsequentes de ouro colorido ou ligas.

Devido ao elevado valor dos metais preciosos, o mercado passou a adotar alternativas de camada intermediária com funções equivalentes, sendo as principais:

- **Bronze branco** — eletrólito composto por liga de cobre-estanho-zinco, que forma depósito com boa resistência à oxidação e baixa porosidade, atuando eficientemente como selante da camada de cobre
- **Níquel** — utilizado há décadas como barreira brilhante e dura, que protege o substrato e fornece superfície nivelada e lisa para receber o ouro

O níquel é metal fortemente alergênico, associado a cerca de 60% dos casos de dermatite de contato por metais, seguido por cromo (13%) e cobalto (8,5%). Por isso, recomenda-se evitar seu uso em peças com contato prolongado com a pele, sendo alternativas comercializadas como **Ni-Free**.

 **Nota técnica e regulatória:** Embora não haja norma brasileira específica para migração de níquel em joias, a legislação europeia estabelece limites por meio do REACH Regulation (EC No 1907/2006) e da EN 1811. Como boa prática, recomenda-se que fabricantes brasileiros adotem

parâmetros equivalentes, especialmente para exportação ou produtos voltados ao mercado de saúde e bem-estar.

Folheação a ouro — camada principal

Após o pré-ouro ou a camada alternativa, realiza-se a folheação a ouro, considerada o coração do processo produtivo de uma joia folheada. É nessa etapa que a peça recebe a camada de metal precioso que a caracterizará no mercado. As características e as condições operacionais da solução de folheação são as seguintes:

- o eletrólito de ouro é uma solução aquosa composta por sais cianídricos e outros sais condutores e metais, como ouro, cobre, prata ou índio, formando assim a liga metálica
 - sua coloração é âmbar translúcida
 - trabalha em temperatura entre 70° e 80°C
 - tensão de trabalho geralmente entre 3,5V e 5,5V
 - densidade de corrente costuma ficar entre 1 A/dm² e >2,5 A/dm²
 - utiliza-se anodos de MMO ou inox 304 / 316 L
 - tempo de imersão varia em função da espessura que se deseja depositar
 - deposita camadas espessas — de 0,5 µm a > 8,0 µm

Existem diversas formulações de banhos de ouro, adequadas a diferentes aplicações mesmo dentro do segmento de bijuterias. A Tabela 4 classifica os eletrólitos em função do pH e das ligas metálicas típicas.

Tabela 4: Tipos de eletrólitos de ouro em função do pH e das ligas empregadas (valores típicos de mercado).

Tipo de eletrólito	pH	Ligas metálicas usuais
Neutro	6 a 8	Cobre, cádmio, prata
Alcalino	8 a 12	Cobre, cádmio, prata
Alcalino cianídrico	8 a 10	Cobre, cádmio, paládio, índio
Levemente ácido	3 a 6	Cobalto, níquel, índio, ferro
Fortemente ácido	0,5 a 2,5	Cobalto, níquel, zinco, estanho

Fonte: elaborada pela autora com base em literatura técnica de galvanoplastia e dados de fornecedores especializados.

A proporção de cada metal na liga da camada depositada na bijuteria influencia parâmetros como dureza do depósito, velocidade de deposição, quilatagem e cor do depósito:

- **Ouro amarelo:** liga composta por 75% de ouro, 12,5% de cobre e 2,5% de prata.
- **Ouro vermelho:** liga composta por 75% de ouro e 25% de cobre.
- **Ouro rosê:** liga composta por 75% de ouro, 22,25% de cobre e 2,75% de prata.
- **Ouro branco:** liga composta por 75% de ouro e 25% de paládio.
- **Ouro verde:** liga composta por 75% de ouro, 15% de prata, 6% de cobre e 4% de cádmio.
- **Ouro negro:** liga composta por 75% de ouro e aproximadamente 15% de prata ou cobalto.

⚠ Nota toxicológica: ligas de ouro verde com cádmio vêm sendo progressivamente substituídas por formulações isentas desse elemento em razão de sua toxicidade e das restrições impostas por regulamentações ambientais e de saúde (Diretiva RoHS 2011/65/EU) e regulamentos correlatos). Recomenda-se evitar o uso de ligas com cádmio em joias de uso cotidiano.

A **quilatagem** é a unidade tradicional de pureza do ouro em ligas, amplamente utilizada em joalheria. A Tabela 5 apresenta a relação entre quilatagem, teor de ouro e aplicações típicas:

Tabela 5: Quilatagem, teor de ouro e aplicações usuais (valores aproximados).

Quilatagem (k)	Ouro (%)	Características principais	Aplicações típicas
24	99,9	Ouro praticamente puro; muito maleável e dúctil; baixa resistência mecânica	Revestimentos eletrônicos, camadas decorativas de alto brilho, moedas e peças de coleção
22	91,7	Coloração amarela intensa; mais resistente que 24k, porém ainda macio	Revestimentos mais resistentes a riscos; joias tradicionais em alguns mercados
21–20	87,5–83,3	Cor amarela; maior resistência mecânica	Revestimentos de uso eventual e peças ornamentais de alto valor
19–18	79,2–75,0	Equilíbrio entre dureza e trabalhabilidade	Revestimentos fino ocidental, relógios, acessórios de padrão elevado

Quilatagem (k)	Ouro (%)	Características principais	Aplicações típicas
17–16	70,8–66,7	Coloração dourada com nuance clara; boa resistência quando ligado a prata e cobre	Revestimentos robustos e componentes técnico-decorativos
15–14	62,5–58,3	Dourado levemente pálido; boa resistência a atritos leves	Revestimentos de uso diário (alianças, anéis), aplicações técnicas diversas
13–12	54,2–50,0	Amarelo suave	Revestimentos de médio custo, como para contatos elétricos
11–10	45,8–41,7	Coloração tendendo ao acobreado; liga mais dura	Revestimentos populares, objetos decorativos sujeitos a desgaste
9 e abaixo	≤ 37,5	Amarelo opaco; alta resistência mecânica	Ligas técnicas para contatos elétricos e eletrônicos

Fonte: Compilado pelo autor e adaptado de World Gold Council (2025)

Diversos países não reconhecem, para fins comerciais, ligas abaixo de 9k como "ouro" em joalheria. Para folheação galvânica, a espessura e a composição do banho são os parâmetros técnicos mais relevantes.

A peça permanece imersa no eletrólito de folheação até atingir a espessura de camada desejada. A quantidade de ouro aplicada pode ser expressa de duas formas:

- **em espessura**, com a unidade **micrômetro (μm)**: $1 \mu\text{m} = 0,001 \text{ mm} = 0,0001 \text{ cm}$
- **em carga de metal**, muitas vezes referida comercialmente como "milésimos", isto é, massa de ouro por massa de peças processadas (por exemplo, gramas de ouro por quilograma de peças — g/kg). O termo tem origem na ourivesaria, onde a liga 750/000 indica 750 partes de ouro em 1000 partes de liga.

É importante destacar que espessuras em microns (μm) e "milésimos" (g/kg) não são grandezas diretamente equivalentes, embora ambas sejam utilizadas no mercado para expressar "quanto ouro foi aplicado". Para fins técnicos e de controle de qualidade, recomenda-se expressar a espessura em micrômetros, determinada por método instrumental confiável. A Figura 12 representa a peça folheada a ouro:

Figura 12: Representação esquemática do processo de folheação a ouro em linha galvânica.



Fonte: Bancos de imagens técnicos de uso livre.

A etapa de cor final consiste na aplicação de uma camada fina — entre 0,1 e 0,5 μm — de eletrólito aquoso alcalino cianídrico, contendo ligas metálicas nas concentrações adequadas para a cor desejada pelo cliente. Trabalha a quente 65 a 70°C com anodos de MMO (óxido metálico misto) ou inox 304 / 316L.

Sua finalidade é uniformizar e ajustar a tonalidade das peças, seguindo as mesmas referências de composição apresentadas na Tabela 5. As cores mais amarelas resultam de maior teor de ouro na liga; as mais avermelhadas, de maior proporção de cobre; e as mais rosadas, de ligas intermediárias de ouro, cobre e prata (Figura 13).

Figura 13: Exemplos de variação de cores em ligas de ouro (amarelo, rosê, vermelho).



Fonte: adaptado de Revista ABTS, n. 221

Após, é realizada a lavagem em água quente (>70°C) que facilita a remoção de resíduos de eletrólito, proporciona o envelhecimento das camadas eletrodepositadas e melhora a eficiência da secagem subsequente.

A secagem é realizada em centrífugas com aquecimento, túneis de ar quente, estufas com ar quente ou meios sólidos absorventes, como sabugo de milho moído. O principal critério na secagem é evitar arranhões na superfície revestida; para peças complexas pode-se usar imersão em álcool etílico antes da secagem para facilitar a evaporação da água, exceto em peças com colagens, pérolas, pedras sensíveis ou componentes incompatíveis com álcool.

3.4.4 Banho de prata – prateação

A prata é outro metal precioso amplamente empregado para recobrimento de joias, valorizado pela beleza de sua coloração clara, pelo brilho natural e pela facilidade de polimento.

Para a folheação em prata, as características operacionais são as seguintes:

- eletrólito aquoso composto por sais de cianeto de prata e potássio complementados por aditivos abrilhantadores e niveladores
- sua coloração é âmbar translúcida
- trabalha em temperatura ambiente ou levemente aquecida
- tensão de trabalho geralmente entre 0,5V e 1,5V.
- densidade de corrente costuma ficar entre 0,5 A/dm² e 1,5 A/dm²
- tempo de imersão varia em função da espessura que se deseja depositar
- deposita camadas espessas — de 1 µm a > 8,0 µm
- utiliza-se anodo de prata em barra, diferentemente dos banhos de ouro, nos quais normalmente se utilizam anodos insolúveis de aço inoxidável, tanto por questões de custo quanto de segurança patrimonial

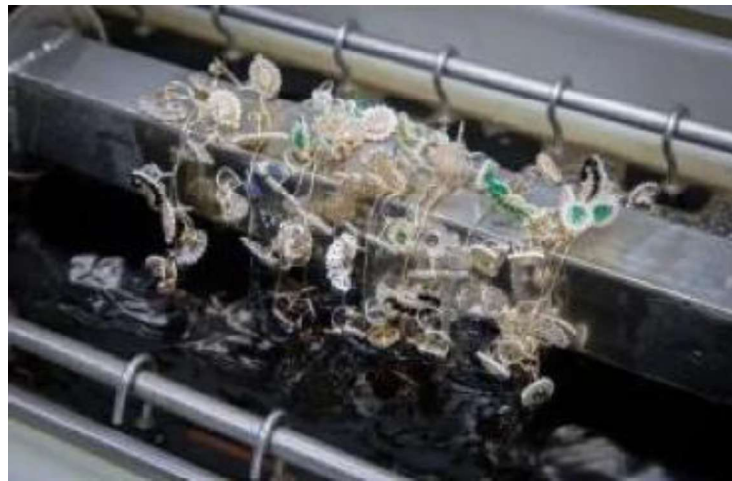
Pré-prata ou strike de prata e folheação

A sequência operacional para peças prateadas é idêntica à das peças douradas até a etapa de cobre ácido. A partir daí, a peça segue para o strike de prata, uma solução eletrolítica alcalina cianídrica, composta por sais de cianeto de potássio e prata, com função de promover aderência inicial e ancoragem para a camada principal de prata a ser depositada na etapa seguinte.

Trabalha em temperatura ambiente ou levemente aquecido, com uma tensão de 3,0 a 5,0 V e densidade de corrente entre 1,5 a 2,5 A/dm², tempo de imersão de 30 a 60 segundos.

Após o strike, a peça recebe a **folheação a prata**, que consiste na camada principal de prata (Figura 14). A folheação a prata confere a espessura e a aparência final da joia. Então é realizado o acabamento e secagem das peças.

Figura 14 – Eletrólito de prata e exemplos de peças prateadas acabadas.



Fonte: bancos de imagens técnicos de uso livre.

3.4.5 Banho de ródio

A prata apresenta alta tendência à oxidação por compostos sulfurados presentes na poluição, cosméticos, suor e borrachas, além de sofrer influência de umidade e produtos de limpeza. Para reduzir o escurecimento, aplica-se uma camada final de ródio (0,1–0,5 μm). O ródio é um metal precioso branco-acinzentado, de elevada dureza e resistência à corrosão e oxidação, usado como selante sobre a prata, também podendo ser aplicado pontualmente com canetas anódicas conectadas a retificadores. Além da joalheria, é empregado em catalisadores automotivos e aplicações técnico-industriais, sendo um dos metais mais valorizados, por ser obtido apenas como subproduto da mineração de metais do grupo da platina.

A camada de ródio:

- protege a prata contra oxidação e escurecimento
- melhora a resistência ao desgaste por abrasão
- confere acabamento mais claro, homogêneo e brilhante

Em termos de dureza, enquanto ouro e prata atingem aproximadamente 2,5 na escala de Mohs, o ródio pode atingir valores próximos a 6, o que se reflete em maior resistência ao risco e ao desgaste superficial.

O eletrólito de ródio é ácido, geralmente composto por sulfato de ródio em solução aquosa, de coloração âmbar translúcida. Trabalha em temperatura de até 30°C, a uma tensão de 2,0 a 3,5V e densidade de corrente de 0,5 a 2,0A/dm². Os anodos utilizados são, tipicamente, placas de titânio platinado, que são insolúveis e garantem a estabilidade da solução ao longo do tempo.

Após o banho de ródio, a peça é encaminhada para a lavagem em água quente e secagem.

3.5 Controle de Qualidade e manutenção de eletrólitos

A manutenção rigorosa dos parâmetros operacionais é fundamental para assegurar a eficiência dos depósitos metálicos e a qualidade final das joias. O controle inadequado ou a negligência desses parâmetros impacta diretamente a uniformidade, a aderência, a cor e o desempenho das camadas ao longo da vida útil do produto. Entre os parâmetros a serem monitorados periodicamente destacam-se:

- verificação e calibração do retificador (corrente, tensão, densidade de corrente)
- controle dos contatos anódicos e catódicos (limpeza, integridade, resistência de contato)
- volume útil do eletrólito (reposição de perdas por arraste e evaporação)
- condição operacional das gancheiras, roletes e tambores (desgaste do revestimento isolante, integridade dos contatos)
- qualidade da água de processo (condutividade, teores de íons críticos como cloretos, dureza)
- temperatura do banho (controle por termostato e verificação periódica)
- pH (medição regular e correção quando necessário)
- concentração dos sais específicos de cada eletrólito
- concentração metálica (ouro, prata, cobre etc.)
- concentração de aditivos e umectantes
- análise em Célula de Hull — ensaio que simula o comportamento do eletrólito em diferentes densidades de corrente, permitindo identificar deficiências de nivelamento, brilho e distribuição de depósito antes que afetem a produção
- avaliação da cor e do aspecto visual do depósito em corpos de prova

O controle analítico dos eletrólitos deve ser realizado por profissional da área química habilitado, com supervisão do Responsável Técnico, utilizando técnicas adequadas para garantir resultados confiáveis. As principais técnicas analíticas empregadas são:

- Fluorescência de raios X (XRF) — para determinação da concentração metálica em solução e medição de espessura de camadas depositadas
- Espectroscopia de absorção atômica (AAS) — para quantificação de metais em solução com alta sensibilidade
- Métodos volumétricos (titulações) — para determinação de componentes como cianetos livres, ácidos e bases
- Métodos gravimétricos e colorimétricos — conforme recomendação do fornecedor de cada solução

Na inspeção das joias acabadas, avaliam-se:

- presença de manchas e descolorações
- riscos e danos superficiais
- aderência da camada (testes de fita adesiva, deformação controlada ou outros ensaios simples)
- cor e uniformidade do depósito
- espessura das camadas de ouro, prata e ródio
- resistência do depósito em testes de uso simulado, quando aplicável
- integridade da peça (soldas, encaixes, mecanismos, pedras cravadas)

A maioria dos parâmetros de qualidade é avaliada visualmente, exceto cor e espessura, que requerem medição por equipamentos instrumentais. Por isso, o ambiente de controle de qualidade deve ser bem iluminado (preferencialmente com cabine de luz de espectro controlado), limpo, organizado e ergonomicamente adequado para inspeção prolongada.

4. BANHO DE ZINCO ELETROLÍTICO

O zinco é um metal de potencial eletroquímico mais eletronegativo que o ferro. Quando aplicado como revestimento sobre substratos ferrosos, atua como camada sacrificial, corroendo-se preferencialmente e protegendo o metal base mesmo na presença de riscos ou descontinuidades do filme. Essa característica, associada ao custo relativamente baixo e à compatibilidade com passivações e selantes, consolidou o zinco como um dos principais revestimentos protetivos utilizados na indústria.

A evolução mais recente dos processos de zincagem está intimamente ligada ao desenvolvimento de ligas de zinco. A literatura descreve que ligas como zinco-ferro, zinco-níquel, zinco-cobalto e estanho-zinco foram desenvolvidas sobretudo a partir da década de 1980 para substituir o cádmio e obter revestimentos com maior desempenho em corrosão. Essas ligas permitem ajustar o potencial de corrosão, tornando o revestimento ainda sacrificial em relação ao aço, porém menos reativo que o zinco puro, o que resulta em taxas de corrosão significativamente menores.

4.1 Materiais tratáveis e campos de aplicação

Os processos de zinco e ligas de zinco são aplicáveis a uma ampla gama de componentes metálicos, desde que corretamente preparados. Em termos gerais, incluem-se:

- metais ferrosos em geral, tais como aços utilizados em estampagem, usinagem, trefilação, conformação mecânica e peças fundidas
- aços de média e alta resistência, empregados em fixadores, molas, componentes estruturais e peças de segurança
- componentes com solda ou brasagem, nos quais diferentes zonas metalúrgicas podem influenciar a cinética de deposição
- peças com tratamentos térmicos (temperadas, revenidas, cementadas), nas quais a heterogeneidade microestrutural influencia o padrão de depósito e a sensibilidade à fragilização por hidrogênio
- ferro fundido cinzento ou nodular, desde que controlada a porosidade e a presença de grafita exposta

- conjuntos com geometria complexa, cavidades profundas ou regiões de difícil acesso, frequentemente tratados com banhos de elevada capacidade de penetração (caso típico dos sistemas alcalinos)

O campo de aplicação abrange a indústria automotiva (fixadores, componentes estruturais e funcionais), linha branca e eletrodomésticos, componentes de sistemas de freio, direção e suspensão, itens de fixação em geral, componentes para ambientes marítimos ou industriais agressivos, entre outros.

4.2 Tipos de processos de zinco e ligas

Processos de zinco alcalinos

Os banhos alcalinos operam em faixas de pH tipicamente entre 12 e 14, nas quais o zinco é mantido em solução sob a forma complexada, com anodo de aço. Os sistemas industriais mais utilizados e principais características são:

- alcalinos isentos de cianeto, hoje a tecnologia de referência em função das restrições ambientais
- alcalinos de baixo teor de cianeto, em declínio, mas ainda presentes em aplicações específicas
- alcalinos amoniacaais, empregados em nichos com requisitos particulares
- excelente poder de cobertura e penetração em áreas de baixa densidade de corrente
- menor tendência a queima em cantos vivos e arestas
- brilho mais baixo de forma natural, dependendo fortemente de aditivos orgânicos (carreadores, niveladores e abrilhantadores)
- maior complexidade de controle químico devido à presença de complexantes e à formação de carbonatos.

Processos de zinco ácidos (cloretos)

Os banhos ácidos são baseados em soluções de cloreto de zinco em presença de sais condutores KCl, NH₄Cl (cloreto de potássio e cloreto de amônio) entre outros, com anodo de aço. São caracterizados por:

- alta velocidade de deposição, com elevada eficiência catódica;
- elevado brilho e acabamento estético;
- manutenção relativamente simples, com ajuste direto de íons Zn^{2+} e cloretos;
- menor poder de penetração em geometrias complexas, se comparados aos sistemas

alcalinos

São amplamente utilizados em parafusos, porcas, arruelas e pequenas peças de grande volume, onde a produtividade e o acabamento visual são determinantes.

Processos de ligas de zinco

As ligas de zinco são utilizadas como anodo e para o fornecimento de zinco para o revestimento, e destacam-se por combinar proteção sacrificial com menor velocidade de corrosão em relação ao zinco puro.

As principais ligas de deposição são:

- Zinco-níquel (Zn-Ni): apresenta teor de níquel na faixa de 8 – 15% na camada, sendo a liga de maior desempenho em corrosão e estabilidade térmica. É amplamente utilizada em aplicações automotivas e ambientes agressivos

- Zinco-ferro (Zn-Fe): ligas usuais contêm entre 15 e 25% de ferro no depósito, com boa soldabilidade e ductilidade, e elevada compatibilidade com passivações escuras

- Zinco-cobalto (Zn-Co): tipicamente 0,6 – 2% de cobalto na liga, com excelente resistência à corrosão, inclusive em atmosferas contendo dióxido de enxofre, e boa estabilidade após exposição térmica

- Estanho-zinco (Sn-Zn): empregado em nichos específicos, sobretudo em componentes eletrônicos e peças sensíveis, quando são desejadas propriedades tribológicas e de soldabilidade diferenciadas

A escolha do sistema (zinco puro ou ligas) deve considerar o perfil de corrosão requerido, a temperatura de serviço, o ambiente (presença de salinidade, SO_2 - dióxido de enxofre, umidade cíclica) e os requisitos de custo e de cadeia de suprimentos

4.3 Etapas do processo

O **pré-tratamento** é realizado com as etapas de desengraxes químico (alcalino ou neutro) e eletrolítico, decapagem ácida, ativação, intercalados por lavagens, conforme mencionado no capítulo 2. A Tabela 6 apresenta as faixas típicas dos parâmetros dos diferentes tipos de zincagem:

Tabela 6: Faixas Típicas e comparação qualitativa entre os tipos de zincagem

ZINCAGEM ALCALINA				
Parâmetro	Faixa típica			
pH	12,0 – 14,0			
Temperatura	20 – 35 °C			
Densidade de corrente	1,0 – 3,0 A/dm ²			
Zinco (complexado)	7 – 12 g/L			
Característica principal	Alta penetração			
ZINCAGEM ÁCIDA				
Parâmetro	Faixa típica			
pH	4,5 – 6,0			
Temperatura	20 – 30 °C			
Densidade de corrente	1,0 – 5,0 A/dm ²			
Zn ²⁺	8 – 15 g/L			
Cloretos totais	20 – 160 g/L			
Característica principal	Alta taxa e alto brilho			
COMPARAÇÃO QUALITATIVA ENTRE ZINCO PURO E LIGAS				
Propriedade	Zn	Zn-Fe	Zn-Ni	Zn-Co
Resistência à corrosão	Média	Média	Muito alta	Alta
Estabilidade térmica	Baixa	Baixa	Alta	Média
Resistência a SO ₂	Baixa	Média	Alta	Muito alta
Custo relativo	Baixo	Médio	Alto	Médio

Fonte: Adaptado de ASM Handbook

A Figura 15 apresente diferentes tipos de peças zincadas:

Figura 15: Diferentes cores de peças banhadas em processos de zincagem eletrolítica



Fonte: Gerado por IA (Gemini pro)

4.3.1 Fragilização por hidrogênio em aços de alta resistência

A fragilização por hidrogênio (HE – Hydrogen Embrittlement) é um fenômeno relevante em zincagem de aços de alta resistência mecânica. Durante etapas como desengraxe eletrolítico, decapagem ácida e deposição eletrolítica, átomos de hidrogênio podem ser gerados na interface metal–eletrólito e difundidos para o interior do material.

Nos aços de elevada resistência e dureza, a solubilidade de hidrogênio é baixa, porém sua difusividade é elevada. O hidrogênio tende a concentrar-se em regiões com alta densidade de defeitos cristalinos e tensões residuais – como entalhes, roscas, regiões de transição geométrica e proximidades de trincas microscópicas – reduzindo a tenacidade e podendo causar fratura retardada, muitas vezes sem deformação plástica aparente.

Importante destacar que a fragilização não é um efeito do zinco em si, mas do hidrogênio difusível introduzido no percurso do tratamento de superfície. Em aços de resistência convencional, o efeito é geralmente negligenciável; em aços de alta resistência, deve ser tratado como requisito crítico de projeto e de processo.

Medidas preventivas:

- minimizar tempos de decapagem e evitar condições excessivamente agressivas

- controlar densidade de corrente em desengraxes eletrolíticos e na zincagem
- evitar sobrecorrentes e queima
- aplicar tratamento térmico de desidrogenação imediatamente após o processo (tipicamente 180–220 °C por algumas horas, conforme especificações de cliente/norma)
 - priorizar rotas de processo e parâmetros recomendados para aços de alta resistência

4.3.2 Controle analítico e ensaios

O controle químico rotineiro nos banhos deve contemplar as quantificações de:

- teor de zinco (livre ou complexado)
- eletrólitos condutores (cloretos, hidróxidos, sais alcalinos)
- complexantes orgânicos e inorgânicos
- aditivos carreadores e abrillantadores (principal e de manutenção)
- carbonatos (banhos alcalinos)
- ferro dissolvido e outros contaminantes metálicos
- pH, densidade e condutividade

O controle do revestimento realizado na peça visa garantir conformidade funcional, utilizando os métodos:

- espessura – por fluorescência de raios X (XRF) ou coulometria
- morfologia e microestrutura – microscopia óptica e eletrônica de varredura (MEV)
- aderência – ensaios com fita, impacto ou abrasão, conforme norma/cliente
- resistência à corrosão – ensaios em névoa salina neutra (ASTM B117 ou especificações internas)
- cor, brilho e uniformidade – avaliação visual comparada a padrões
- coeficiente de atrito – em aplicações automotivas (fixadores) após aplicação de selantes/top coats

Nas Tabelas 7, 8 e 9 são apresentados quadros de apoio à análise de falhas em banhos de zinco e ligas. Alguns mecanismos estão em linha com tabelas de solução de problemas apresentados no ASM Handbook para processos de eletrodeposição, nos quais defeitos como depósitos escuros, queimados e

alterações de composição são associados a contaminações metálicas, matéria orgânica degradada ou desequilíbrio da solução, com correções por eletrólise, filtração com carvão e ajustes analíticos.

Tabela 7: Defeitos de aparência e morfologia

Falha observada	Causas prováveis	Ações corretivas principais
Depósito escuro em áreas de baixa densidade de corrente	Contaminação por cobre ou outros metais mais nobres; pré-tratamento insuficiente	Identificar e eliminar fonte de contaminação; eletrolisar banho; filtrar; ajustar pré-tratamento
Depósito queimado em cantos e arestas	Densidade de corrente excessiva; baixa condutividade; aditivos insuficientes	Reduzir corrente; aumentar eletrólito condutor; ajustar concentração de abrillantadores
Depósito fosco onde se espera alto brilho	Exaustão de aditivos; contaminação orgânica; pH fora de especificação	Repor aditivos; realizar tratamento com carvão ativado; corrigir pH
Mancha ou variação de cor após passivação	Espessura desigual; contaminação em lavagens; tempo/pH de passivação inadequados	Melhorar lavagens; ajustar tempo e pH da passivação; revisar pré-tratamento
Pites e crateras na superfície	Inclusão de partículas; gás aprisionado; sujidade residual	Filtrar continuamente; melhorar limpeza mecânica/química; otimizar agitação

Fonte: Adaptado de ASM Handbook

Tabela 8: Defeitos de aderência e integridade

Falha observada	Causas prováveis	Ações corretivas principais
Desplacamento total ou parcial do Zn	Pré-tratamento inadequado; desengraxe insuficiente; decapagem irregular	Revisar sequência de pré-tratamento; reforçar desengraxe; controlar decapagem
Descascamento entre Zn e passivação	Contaminação na etapa de lavagem; ataque excessivo da passivação; envelhecimento do banho	Reforçar lavagens; ajustar concentração/tempo da passivação; renovar parcialmente o banho
Bolhas ou ampolas sob o revestimento	Gases aprisionados; contaminações na interface; superaquecimento local	Ajustar densidade de corrente; melhorar agitação; verificar contato elétrico
Trincas finas na camada	Espessura excessiva; esforços mecânicos posteriores; parâmetros térmicos inadequados	Otimizar espessura; rever manuseio e processos subsequentes; revisar secagem/estufas

Fonte: Adaptado de ASM Handbook

Tabela 9: Defeitos específicos de ligas de zinco

Falha observada	Causas prováveis	Ações corretivas principais
Composição da liga fora da faixa (ex.: Zn-Ni baixo)	Área anódica desbalanceada; reposição inadequada de sais da liga; arraste excessivo	Ajustar área de anodos; corrigir concentrações analíticas; reduzir arraste e melhorar lavagens
Depósito com cor fora do padrão da liga	Variação na composição; passivação não adequada à liga; envelhecimento dos aditivos	Analisar composição; utilizar passivações específicas para a liga; repor/renovar aditivos
Resistência à corrosão abaixo do especificado	Espessura insuficiente; passivação ou selante inadequados; presença de fases menos nobres	Garantir espessura mínima; ajustar sistema de passivação/selagem; revisar parâmetros do banho
Redução acentuada de desempenho após exposição térmica	Liga pouco estável à temperatura de serviço; seleção inadequada do sistema (ex.: Zn-Fe em alta temperatura)	Reavaliar especificação da liga; considerar Zn-Ni ou Zn-Co para aplicações de alta temperatura

Fonte: Adaptado de ASM Handbook

Os processos de zincagem e deposição de ligas de zinco são amplamente utilizados para proteção anticorrosiva. Seu desempenho depende da escolha adequada do tipo de banho, do pré-tratamento correto, do controle dos parâmetros operacionais, do gerenciamento da fragilização por hidrogênio em aços de alta resistência e do monitoramento analítico do processo.

Os mapas de falhas apresentados neste capítulo devem ser utilizados como ferramenta de apoio à análise de problemas em linha, sempre complementados por ensaios laboratoriais e, quando necessário, por investigações metalográficas e de engenharia de falhas.

5. PASSIVAÇÃO

A passivação ou cromatização é um processo de conversão química em que a superfície metálica reage com uma solução aquosa contendo compostos de cromo, formando um filme protetivo aderente que aumenta a resistência à corrosão e fornecer uma superfície adequada para aplicação de pinturas e revestimentos orgânicos, além de conferir características com diferentes colorações e melhorar o desempenho da peça em ambientes úmidos ou agressivos. Durante o processo ocorre um ataque químico controlado, com dissolução parcial do substrato (metal base) e formação de um filme composto por compostos de cromo e elementos do material base.

Esse processo pode ser aplicado a diversos metais e revestimentos metálicos, incluindo peças de aço, de magnésio, peças zincadas e com revestimentos de cádmio, sendo amplamente utilizado na indústria para melhoria do desempenho superficial.

Diferentemente dos processos de deposição, não há interface definida entre revestimento e substrato, pois ocorre incorporação de elementos do metal na camada formada, garantindo alta aderência e estabilidade do revestimento.

O revestimento resultante é tipicamente fino, com espessura na faixa de nanômetros a poucos micrômetros, amorfo, aderente ao substrato e parcialmente solúvel em meio aquoso.

A proteção contra corrosão está associada à presença de espécies de cromo na camada formada. Em sistemas com cromo hexavalente, parte desse cromo atua como agente de auto cicatrização, reagindo em regiões onde o revestimento foi danificado e mantendo a proteção ao longo do tempo. A eficiência do processo depende da interação entre a solução de tratamento e a superfície metálica, sendo influenciada pela composição do banho, tempo de contato e condições da superfície tratada.

5.1 Tipos de passivação

Os processos de passivação podem ser classificados conforme a composição química das soluções utilizadas e as características do revestimento formado. Nas Tabelas 10 e 11, destacam-se dois principais sistemas baseados em compostos de cromo e a classificação por aspecto do revestimento, respectivamente.

Tabela 10: Tipos de passivação e características

Tipo de passivação	Composição	Características principais	Desempenho	Observações
Cromo hexavalente (Cr ⁶⁺)	Compostos de Cr ⁶⁺	Filme com Cr ³⁺ e Cr ⁶⁺ , auto cicatrizante	Alto	Uso restrito por questões ambientais
Cromo trivalente (Cr ³⁺)	Compostos de Cr ³⁺	Filme estável, sem autocura	Médio a alto	Amplamente utilizado atualmente

Fonte: Adaptado de ASM Handbook

Passivação com cromo hexavalente (Cr⁶⁺)

São os mais tradicionais e apresentam elevada resistência à corrosão, devido à presença de espécies de cromo com capacidade de auto cicatrização.

Apesar do excelente desempenho, seu uso vem sendo reduzido em função de restrições ambientais e toxicidade associada aos compostos de cromo hexavalente.

Passivação com cromo trivalente (Cr³⁺)

Os sistemas trivalentes foram desenvolvidos como alternativa aos processos hexavalentes, apresentando menor impacto ambiental e maior adequação às exigências regulatórias.

Embora não apresentem o mesmo efeito de auto cicatrização, oferecem bom desempenho anticorrosivo e ampla aplicação industrial.

Na passivação em sistemas de galvanização a fogo (zincagem a fogo), pode ser utilizado cromo hexavalente (Cr⁶⁺) em baixas concentrações ou outras tecnologias a base de compostos orgânicos, para retardar o aparecimento da corrosão branca, que aparece como um pó branco ou cinza, volumoso e solto, resultante da reação do zinco com umidade em ambientes com pouca circulação de ar.

Tabela 11: Classificação por aspecto do revestimento

Tipo de revestimento	Aparência	Característica	Aplicação típica
Incolor / azul	Transparente a levemente azulado	Filme fino	Aplicações estéticas e base para pintura
Amarelo / iridescente	Dourado a multicolorido	Filme intermediário	Proteção anticorrosiva geral
Preto	Escuro uniforme	Filme mais espesso	Aplicações estéticas e funcionais
Verde / oliva	Verde escuro	Filme espesso	Aplicações específicas (ex.: militar)

Fonte: Adaptado de ASM Handbook

A coloração do revestimento está diretamente relacionada à espessura e à composição do filme formado, podendo variar conforme o processo e as condições operacionais.

A escolha do tipo de passivação deve considerar requisitos de resistência à corrosão, exigências ambientais e regulatórias, necessidade de acabamento estético, compatibilidade com processos posteriores (pintura ou selagem) e tipo de material ou revestimento a ser tratado.

5.2 Etapas do processo de passivação

Inicialmente é realizado o pré-tratamento de desengraxe e ativação, intercaladas por etapas de lavagens, conforme descrito no capítulo 2. A ativação pode ser incorporada ao banho ou ocorrer em etapa separada, conforme o sistema químico adotado.

Após, é realizada a passivação para a formação do filme protetivo. Os processos de passivação são realizados por imersão ou aspersão das peças em soluções aquosas contendo compostos de cromo, promovendo a formação de um filme protetivo na superfície metálica. O revestimento resulta de um ataque químico controlado, seguido da precipitação de compostos de cromo e elementos do substrato, formando uma camada fina, aderente e contínua. O processo apresenta tempos curtos de tratamento e

operação próxima à temperatura ambiente, variando conforme o sistema utilizado e o desempenho requerido.

O processo de passivação apresenta relativa simplicidade operacional, porém é sensível às condições da superfície e ao controle das etapas envolvidas.

Devem ser considerados:

- a condição da superfície antes do tratamento, que influencia diretamente a formação do filme;
- a eficiência das etapas de limpeza e lavagem, fundamentais para evitar contaminações;
- o tempo de contato com a solução, que impacta na espessura e no desempenho do revestimento;
- a uniformidade de aplicação, especialmente em peças com geometria complexa;
- as condições de secagem, que influenciam a aparência final do revestimento.

As falhas ao longo do processo geralmente não são compensadas em etapas posteriores, podendo resultar em defeitos visuais e redução da resistência à corrosão.

Após a passivação são realizados os processos de lavagem, secagem e a selagem (opcional), para aumentar resistência à corrosão.

5.3 Parâmetros operacionais

O desempenho dos processos de passivação depende do controle dos parâmetros operacionais, que influenciam a formação do filme, sua espessura e a resistência à corrosão. Esses processos operam, em geral, com soluções ácidas, tempos curtos de tratamento e temperaturas próximas à ambiente, variando conforme o sistema químico utilizado. Os dados da Tabela 12 indicam os principais parâmetros de controle do processo.

Tabela 12: Parâmetros operacionais típicos de passivação

Parâmetro	Função no processo	Faixa típica	Impacto fora de faixa
Concentração de cromo	Formação do filme protetivo	Conforme processo	Baixa: deposição insuficiente Alta: instabilidade
pH	Controle da reatividade do sistema	1,5 a 3,0	Baixo: ataque excessivo Alto: baixa formação
Fluoretos	Ativação da superfície e crescimento do filme	Controlado	Baixo: filme fino Alto: ataque ao substrato
Contaminação metálica	Indica envelhecimento do banho	Conforme processo	Alta: defeitos e perda de desempenho
Tempo de uso do banho	estabilidade do processo	10- 120 seg.	Elevado: perda de eficiência
Temperatura	Influencia a cinética da reação	Ambiente a 40°C	Alta: reação acelerada Baixa: filme incompleto

Fonte: Adaptado de ASM Handbook

5.3.1 Controle de processo

O controle dos parâmetros do processo tem como objetivo garantir a estabilidade da solução de tratamento e a formação de um revestimento uniforme e com desempenho consistente. Embora o controle químico da passivação seja menos complexo que em outros processos de conversão, exige atenção à estabilidade dos componentes ativos e à presença de contaminantes, devendo ser realizado de forma sistemática para assegurar repetibilidade e qualidade do revestimento. Devem ser considerados:

- o monitoramento periódico da estabilidade da composição da solução
- a reposição controlada dos componentes ativos
- o controle da contaminação por arraste de etapas anteriores
- a avaliação da vida útil do banho
- a manutenção de condições operacionais estáveis
- a influência direta do tempo de tratamento na espessura do revestimento

Os processos de passivação podem apresentar defeitos (Tabela 13) que comprometem a aparência e a resistência à corrosão do revestimento, geralmente associados a falhas no controle do processo, condições inadequadas da superfície ou instabilidade do banho.

Tabela 13: Defeitos típicos, causas e ações corretivas

Defeito	Causa provável	Ação corretiva
Baixa resistência à corrosão	Filme fino / tempo insuficiente / baixa concentração	Ajustar parâmetros e concentração do banho
Manchas ou irregularidades	Contaminação superficial / lavagem inadequada	Melhorar limpeza e etapas de lavagem
Variação de cor	Instabilidade do banho / variação de tempo	Ajustar controle do processo
Descascamento do revestimento	Superfície inadequada / ataque excessivo	Revisar preparação superficial e parâmetros
Camada iridescente irregular	Aplicação não uniforme / tempo inconsistente	Garantir uniformidade de processo
Filme muito fino ou inexistente	Baixa atividade do banho / pH elevado	Ajustar pH e composição
Ataque excessivo ao substrato	pH baixo / fluoreto elevado	Corrigir parâmetros do banho

Fonte: Adaptado de ASM

Os defeitos geralmente não são isolados, podendo ocorrer de forma combinada e impactar significativamente o desempenho final do revestimento.

⚠ Nota ambiental: Os processos de passivação com compostos de cromo sofrem restrições ambientais e regulatórias, devido à toxicidade do cromo hexavalente (Cr^{6+}), classificado como substância de alta periculosidade e potencial carcinogênico, sujeito a controle no uso, manuseio, descarte e exposição ocupacional. Por isso, há crescente substituição por sistemas de cromo trivalente (Cr^{3+}) e tecnologias com menor impacto ambiental.

A utilização de processos de passivação deve considerar o desempenho técnico, os requisitos ambientais e de segurança, o atendimento à legislação, o controle de efluentes contendo metais e substâncias tóxicas, o manuseio seguro de produtos químicos e o monitoramento da exposição

ocupacional. Observa-se na indústria a redução do uso de cromo hexavalente, com adoção de tecnologias mais seguras e de menor impacto ambiental.

Em síntese, é fundamental ressaltar que os processos de passivação são, em sua maioria, baseados em tecnologias proprietárias, sendo indispensável o seguimento das recomendações do fornecedor, conforme estabelecido em boletins técnicos e especificações de processo. O não atendimento a essas orientações pode resultar em variações de desempenho, instabilidade do banho e aumento da incidência de defeitos.

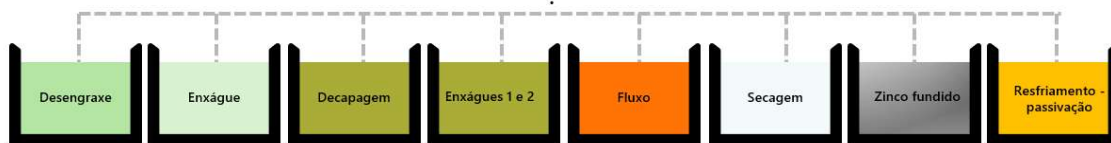
6. GALVANIZAÇÃO/ZINCAGEM A FOGO

A imersão em banho de zinco fundido também é conhecida como galvanização por imersão a quente e/ou zincagem. Diferente de outros tratamentos de superfície metálica, não é utilizada corrente elétrica no banho.

A preparação da superfície é uma etapa crítica na aplicação do revestimento. A galvanização possui mecanismos próprios de “controle de qualidade”. O zinco não reage com superfícies sujas ou contaminadas.

Assim, falhas ou inadequações na preparação da superfície (conforme ABNT NBR 6323:2016, Anexo A) tornam-se imediatamente aparentes quando o aço é retirado do banho de zinco: as áreas mal preparadas permanecem sem revestimento ou com falhas, exigindo retrabalho ou descarte. As etapas do processo são demonstradas na Figura 16:

Figura 16: Esquema do processo de galvanização a fogo



Fonte: ABRACO/adaptado de Intercorr 2014.

Entre as etapas de pré-tratamento estão o desengraxe e a decapagem, citados no capítulo 2. Após estas etapas é realizada a fluxagem, o banho de zinco fundido e a passivação. Todos os banhos são intercalados por etapas de lavagens.

6.1 Fluxo (fluxagem)

A etapa de fluxo é a fase final de preparação da superfície no processo de galvanização a fogo. Seu objetivo é:

- remover óxidos remanescentes que possam se formar após o enxágue
- depositar uma camada protetora temporária na peça, para evitar a formação de novos óxidos até a imersão no zinco fundido
- reduzir a tensão superficial na interface metal fundido/peça durante a imersão, permitindo melhor interação metalúrgica entre o zinco fundido e o aço

Normalmente, utiliza-se uma solução contendo cloreto de zinco (ZnCl_2) e cloreto de amônio (NH_4Cl), operando em uma faixa de temperatura de aproximadamente 25 a 75 °C.

Existem formulações de fluxo do tipo sal duplo e sal triplo:

- **Sal duplo:** 1 parte de cloreto de zinco para 2 partes de cloreto de amônio (1:2)
- **Sal triplo:** 1 parte de cloreto de zinco para 3 partes de cloreto de amônio (1:3)

Os controles principais que devem ser feitos no banho de fluxo são:

- pH
- temperatura
- concentração de matéria-prima (ZnCl_2 e NH_4Cl)
- teor de contaminantes (em especial ferro sob a forma de FeCl_2)
- aspecto visual (cor, formação de lodo etc.)

É recomendado manter o menor teor possível de ferro no banho de fluxo. Como referência, teor de $\text{FeCl}_2 < 5 \text{ g/L}$ (ideal em torno de 2,5 g/L) contribui para melhor qualidade do revestimento e menor formação de borra no banho de zinco.

A secagem pode ser feita em estufas, túneis aquecidos ou por outros sistemas de aquecimento adequados, dependendo do layout da planta e do tipo de material processado, e tem como objetivo:

- reduzir a umidade das peças após o fluxo, evitando choques térmicos na imersão (explosões localizadas por vaporização súbita de água)
- reduzir a formação de cinzas de zinco, que se formam na superfície do banho durante a imersão.

6.2 Banho de zinco fundido

Durante a etapa de galvanização propriamente dita, o material é completamente imerso em um banho de zinco fundido. O grau de pureza do zinco utilizado como matéria-prima é especificado pela norma ASTM B6, que requer, tipicamente, 99,99% de zinco puro ou superior. Na cuba, o zinco é mantido a temperaturas da ordem de 435 a 455 °C.

Enquanto imerso na cuba, o zinco reage com o ferro do aço carbono ou do ferro fundido, formando camadas de ligas intermetálicas zinco–ferro, ligadas metalurgicamente ao substrato, usualmente recobertas por uma camada externa de zinco praticamente puro, mais resistente à corrosão.

A principal parcela da espessura do revestimento é formada nesse primeiro momento de imersão. Em seguida, a reação torna-se mais lenta e a espessura não aumenta de maneira significativa, mesmo se a peça permanecer imersa por mais tempo. O tempo total de imersão depende das especificações de revestimento desejadas e das características da peça podendo, em muitos casos, alcançar até cerca de 15 minutos.

Após a formação do revestimento:

- a peça é retirada lentamente do banho de galvanização
- o excesso de zinco é removido por drenagem e, em alguns casos, por centrifugação (especialmente para peças pequenas ou com geometria específica)
- a reação metalúrgica pode continuar por curto período após a retirada, enquanto a temperatura da peça ainda é próxima à do banho. A Figura 17 apresenta uma peça galvanizada a fogo com zinco fundido

Figura 17: Peça galvanizada a fogo



Fonte: Gerado por Chat GPT (2026)

Os controles principais que devem ser feitos no banho de zinco fundido são:

- pureza do banho: preferencialmente $\geq 98\%$ de zinco na cuba ou conforme STM B6, tipicamente $> 99,95\%$

- ligas (Al, Ni, Bi, etc) podem ser adicionadas para ajustar características metalúrgicas e de aspecto, desde que, em conjunto, não ultrapassem cerca de 2% do banho, conforme normas ABNT NBR 6323:2016, ASTM A123/A123M:2014 e ISO 1461

- teor de ferro dissolvido: deve ser mantido o mais baixo possível

É recomendado manter baixo teor de ferro no banho de zinco, pois, de forma aproximada, para cada 4 g de ferro livre incorporado ao banho podem ser consumidos cerca de 96 g de zinco na forma de borra, aumentando perdas e custos.

As peças galvanizadas são resfriadas por imersão em solução de passivação, imersão em água ou exposição ao ar ambiente, conforme o procedimento adotado pela instalação e a finalidade do produto.

Após o banho de galvanização a fogo é realizada a passivação (Figura 18), com a finalidade de aumentar a proteção da peça contra a chamada corrosão branca, favorecendo a formação de produtos estáveis, como o carbonato de zinco. A passivação está melhor detalhada no capítulo 5.

Figura 18: Exemplo ilustrativo de corrosão branca em peça galvanizada exposta a alta umidade - Aço recém galvanizado e Corrosão branca em aço



Fonte: Gerado por Gemini (2026) adaptado Ferrugem Branca em Aço Galvanizado | Prevenção e Tratamento pelo revisor.

6.3 Inspeção

A inspeção do aço galvanizado por imersão a quente é, em geral, simples e relativamente rápida.

As duas propriedades mais avaliadas do revestimento galvanizado são:

- espessura do revestimento (ou massa de zinco por unidade de área)
- aparência/condição da superfície (uniformidade, ausência de áreas sem revestimento,

defeitos de aderência, escorrimientos excessivos, inclusões etc.)

Outros ensaios podem ser realizados mediante solicitação prévia, por exemplo, ensaios de aderência, ensaios de corrosão acelerada e verificações dimensionais.

Os produtos são galvanizados de acordo com normas técnicas definidas antes da etapa de galvanização. Entre as principais normas de referência destacam-se:

- ABNT NBR 6323:2016 – Revestimentos de zinco por imersão a quente em produtos de aço e ferro fundido
- ASTM A123/A123M:2014 – Zinc (Hot-Dip Galvanized) Coatings on Iron and Steel Products
- ISO 1461 – Hot dip galvanized coatings on fabricated iron and steel articles –

Specifications and test methods

7. FOSFATIZAÇÃO

A fosfatização é um processo de conversão química no qual a superfície de um metal reage com uma solução aquosa ácida contendo fosfatos, resultando na formação de uma camada insolúvel de fosfato aderida ao substrato (metal base utilizado). Os metais base podem ser metais ferrosos (aço e ferro), e metais não ferrosos, como zinco, alumínio, cobre e latão.

Diferentemente dos processos eletrolíticos, a fosfatização não envolve aplicação de corrente elétrica. A formação da camada ocorre exclusivamente por meio de reações químicas na interface metal–solução, sendo fortemente dependente das condições locais dessa interface.

O revestimento formado no substrato possui, tipicamente:

- **estrutura cristalina ou amorfa**, dependendo do sistema de fosfatização utilizado
- **estrutura porosa e com capacidade de absorção**, permitindo retenção de óleos, ceras, lubrificantes e tintas, além de favorecer a ancoragem mecânica de revestimentos posteriores
- **forte aderência ao substrato metálico**, garantindo estabilidade da camada
- **baixa condutividade elétrica**, atuando como isolante em relação ao metal base e reduzindo a formação de células galvânicas na interface metal/revestimento
- **espessura controlável**, geralmente expressa em massa por área (g/m^2), permitindo ajuste conforme a aplicação desejada

Essas características tornam a fosfatização especialmente adequada como camada intermediária em sistemas de proteção anticorrosiva, promover melhor aderência de tintas e óleos e como auxílio em processos de conformação mecânica.

A formação da camada fosfatada ocorre por um conjunto de reações químicas e eletroquímicas locais, que podem ser descritas em etapas sequenciais:

A solução fosfatizante, de caráter ácido, promove a dissolução inicial do metal, principalmente ferro, liberando íons metálicos para a solução e hidrogênio na superfície.

A superfície metálica apresenta regiões anódicas e catódicas distribuídas de forma heterogênea. Nas regiões anódicas ocorre a dissolução do metal, enquanto nas regiões catódicas há consumo de íons hidrogênio.

O consumo de íons H^+ nas regiões catódicas provoca um aumento localizado do pH na interface metal–solução, criando condições favoráveis à precipitação de compostos insolúveis.

Com a elevação do pH local, os fosfatos presentes na solução reagem com os íons metálicos dissolvidos (como Fe^{2+} e Zn^{2+}), formando fosfatos insolúveis que precipitam sobre a superfície.

Os primeiros cristais formados atuam como núcleos para o crescimento subsequente da camada. A taxa de nucleação e crescimento determina o tamanho, a morfologia e a densidade da estrutura cristalina.

A camada formada apresenta uma microestrutura característica, que varia conforme o tipo de fosfatização e as condições do processo.

A morfologia da camada — amorfa, microcristalina ou cristalina — depende principalmente da composição do banho, da presença de aceleradores e da etapa de ativação.

A composição química e o estado superficial do material base influenciam diretamente a formação da camada fosfatada, pois diferentes materiais apresentam comportamentos distintos na nucleação e no crescimento cristalino.

O comportamento dos materiais no processo de fosfatização também varia de acordo com sua composição e características superficiais. O aço de baixo carbono apresenta alta reatividade, o que favorece a formação de uma camada fosfatada mais uniforme. Já o aço de alto carbono possui reatividade reduzida, podendo exigir ajustes nos parâmetros do processo para garantir uma boa formação da camada. No caso do aço galvanizado, a superfície é bastante reativa, sendo necessário um controle adequado da passivação para evitar reações excessivas. O alumínio apresenta reação limitada no processo de fosfatização, geralmente exigindo a presença de fluoretos para viabilizar a formação da camada. Por sua vez, o ferro fundido possui alta rugosidade superficial, característica que contribui para uma boa retenção da camada fosfatada.

7.1 Tipos de fosfatização

Os processos de fosfatização são classificados de acordo com o metal predominante na camada formada, sendo os principais: fosfato de ferro, fosfato de zinco e fosfato de manganês.

Cada sistema apresenta características específicas de estrutura, peso de camada e desempenho, sendo selecionado conforme a aplicação final do componente.

Fosfato de ferro

Os revestimentos de fosfato de ferro apresentam estrutura predominantemente amorfa e formam camadas finas com baixa massa por área. Esses sistemas operam em faixas de pH mais elevadas

(3,8 a 5,0) e são amplamente utilizados em processos por spray em linhas de alta produtividade. Sua principal aplicação é como base para pintura, proporcionando boa aderência do revestimento orgânico, uniformidade de superfície e baixo custo operacional. Em termos de proteção anticorrosiva, apresentam desempenho inferior aos sistemas à base de zinco, sendo sua eficiência dependente do sistema de pintura subsequente.

Fosfato de zinco

Os processos de fosfato de zinco formam camadas cristalinas com maior espessura e massa por área, proporcionando melhor desempenho em corrosão em comparação ao fosfato de ferro. Esses sistemas podem ser aplicados por spray ou imersão e são amplamente utilizados na preparação para pintura de alto desempenho, em processos de conformação mecânica e em sistemas combinados com óleos ou selantes. A estrutura porosa da camada favorece a retenção de revestimentos subsequentes, enquanto a natureza cristalina contribui para maior resistência à corrosão.

Fosfato de manganês

Os revestimentos de fosfato de manganês apresentam camadas mais espessas e estrutura cristalina bem definida, com elevada capacidade de retenção de óleo. São utilizados principalmente em aplicações funcionais, como componentes sujeitos a desgaste, engrenagens, eixos e partes móveis, e em sistemas que requerem lubrificação inicial (*break-in*). A camada atua como reservatório de lubrificante e elemento redutor de atrito, contribuindo para a prevenção de gripagem e desgaste prematuro.

Fosfato tricatiônico

Com o aumento das exigências de desempenho, os processos de fosfatização evoluíram a partir dos sistemas convencionais, principalmente os de fosfato de zinco, por meio da modificação da composição dos banhos.

Os sistemas tradicionais apresentam limitações, como, menor resistência à corrosão (fosfato de ferro), variabilidade de cristalização (zinco convencional) e aplicação restrita a funções específicas (manganês). Para superar essas limitações, foram introduzidos íons metálicos adicionais, como níquel (Ni^{2+}) e manganês (Mn^{2+}), originando os sistemas conhecidos como fosfatização tricatiônica, que se baseia na presença de três cátions principais no banho:

- zinco (Zn^{2+})
- níquel (Ni^{2+})

- manganês (Mn^{2+})

Os sistemas tricatiônicos mantêm os princípios fundamentais da fosfatização, porém com melhor controle de cristalização e desempenho. Sua aplicação é recomendada em situações que exigem maior resistência à corrosão e melhor aderência de revestimentos orgânicos.

A escolha do tipo de fosfatização deve considerar os requisitos de resistência à corrosão, a aderência de revestimentos orgânicos, as condições de operação do componente, além do custo do processo e da produtividade da linha. De forma geral, podemos destacar que:

- fosfato de ferro é priorizado quando o foco é custo e produtividade
- fosfato de zinco é utilizado quando se busca melhor desempenho anticorrosivo
- fosfato de manganês é aplicado onde propriedades tribológicas são críticas
- fosfato tricatiônico é utilizado como pré-tratamento para processos de pintura

Na Tabela 14 podemos comparar os sistemas de fosfatização.

Tabela 14: Comparação entre sistemas de fosfatização

Sistema	Estrutura	Peso da camada (g/m ²)	Resistência à corrosão	Aplicação típica	Características
Ferro	Amorfa	0,3 - 1,0	Baixa	Base para Pintura de baixa exigência	Baixo custo, menor proteção, alta aderência
Zinco	Cristalina	1,0 - 40,0	Média	Uso geral pintura, conformação	Boa resistência à corrosão, camada porosa
Tricatiônico	Microcristalina	2,0 – 3,0	Alta	Pintura de alto desempenho	Maior uniformidade da camada, aumento da resistência à corrosão
Manganês	Cristalina	5,0 - 40,0	Média	Desgaste, antifricção	Alta retenção de óleo, efeito lubrificante

Fonte: Adaptado Handbook

7.2 Etapas do processo de fosfatização

O **pré-tratamento** é etapa crítica no processo de fosfatização, pois a formação da camada depende diretamente do contato entre a solução fosfatizante e a superfície metálica. A presença de contaminantes, óxidos ou resíduos compromete a nucleação e o crescimento da camada, resultando em falhas de cobertura, baixa aderência, variação da espessura e defeitos. A sequência pode variar conforme a aplicação, porém segue uma estrutura básica de desengraxe, decapagem e ativação (*também chamada de refino*), intercalados por águas de lavagem, conforme descrito no capítulo 2.

No caso da fosfatização, a ativação (refino), geralmente realizada com soluções contendo **compostos à base de titânio**, promove a formação de núcleos homogêneos de cristalização, importantes em sistemas à base de zinco e tricatiônicos, pois influencia diretamente no tamanho do cristal, densidade da camada e uniformidade do revestimento.

Influência da ativação na camada fosfatada

A ativação (refino) exerce papel fundamental na formação da camada fosfatada. Quando o processo ocorre sem ativação, formam-se cristais grandes, resultando em baixa uniformidade do revestimento. Em casos de ativação inadequada, a camada apresenta cristais irregulares, o que pode gerar variações no desempenho do tratamento. Por outro lado, quando a ativação é realizada de forma adequada, obtém-se uma estrutura microcristalina uniforme, que proporciona melhor aderência e maior proteção contra a corrosão.

O controle do pré-tratamento deve considerar a concentração e renovação dos banhos, a temperatura de operação, o tempo de contato, a eficiência das lavagens e o controle de arraste entre etapas. Falhas nessa etapa não são compensadas posteriormente, sendo uma das principais causas de problemas em processos de fosfatização.

7.2.1 Parâmetros operacionais

O desempenho do processo de fosfatização está diretamente relacionado ao controle dos parâmetros operacionais (Tabela 15), que influenciam a cinética de reação, a morfologia da camada e sua uniformidade.

Pequenas variações nesses parâmetros podem resultar em alterações significativas no peso de camada, tamanho de cristal e desempenho anticorrosivo.

Tabela 15: Parâmetros operacionais típicos

Tipo de fosfato	pH	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Método	Característica da camada
Ferro	3,8 – 5,0	25 – 65	1 – 5	Spray/Imersão	Camada fina e amorfa
Zinco (spray)	2,5 – 3,4	40 – 80	2 – 10	Spray	Camada uniforme
Zinco (imersão)	1,4 – 2,4	50 – 95	5 – 20	Imersão	Camada mais espessa
Manganês	1,5 – 3,0	90 – 95	5 – 30	Imersão	Camada cristalina espessa
Tricatiônico	2,5 – 3,5	40 – 60	2 – 8	Spray/Imersão	Camada microcristalina uniforme

Fonte: Adaptado Handbook

Cada variável atua diretamente na formação da camada:

- pH: controla o equilíbrio entre dissolução do metal e precipitação dos fosfatos
- temperatura: acelera a cinética de reação e influencia o tamanho de cristal
- tempo: determina o peso de camada
- composição química: define a estrutura e propriedades do revestimento
- método de aplicação: influencia a renovação da solução na interface

Os parâmetros operacionais do processo de fosfatização influenciam diretamente a formação e a qualidade da camada fosfatada. Quando o pH se encontra baixo, ocorre reação excessiva, podendo resultar em camada irregular ou até ataque ao substrato. Por outro lado, pH elevado reduz a reatividade do banho, favorecendo a formação de uma camada muito fina ou até inexistente. A temperatura também exerce papel importante: valores altos aceleram a reação e tendem a formar cristais mais grossos, enquanto temperaturas baixas tornam a reação lenta, podendo gerar camada incompleta. Além disso, o tempo de tratamento deve ser cuidadosamente controlado, pois tempos elevados promovem

crescimento excessivo da camada, tornando-a espessa e heterogênea, enquanto tempos curtos resultam em formação incompleta e baixa cobertura da superfície.

O controle adequado dos parâmetros do processo deve garantir repetibilidade, estabilidade da composição química, uniformidade da camada e desempenho consistente do revestimento. A operação fora das condições ideais pode causar variações de qualidade e aumento da incidência de defeitos, tornando o monitoramento contínuo essencial para a confiabilidade do processo. A Figura 19 apresenta metais com diferentes tipos de fosfatização:

Figura 19: Metais fosfatizados com diferentes banhos de fosfato



Fonte: Imagem gerada por: Gemini pro (2026)

7.2.2 Controle químico do banho

O controle dos parâmetros do controle químico do banho (Tabela 16) é fundamental para a estabilidade do processo de fosfatização. Os principais parâmetros monitorados são:

Tabela 16: Parâmetros químicos e suas funções

Parâmetro	Função no processo	Impacto fora de faixa
AL (acidez livre)	Define a reatividade do banho	Baixa AL → camada fraca ou inexistente
AT (acidez total)	Representa a reserva química	Alta AT → cristal grosso / lodo
AL/AT	Equilíbrio do sistema	Instabilidade do processo
Ferro dissolvido	Indica carga do banho	Alto → formação de lodo
Acelerador	Controla a cinética da reação	Baixo → reação lenta / irregular
Zn ²⁺	Formação da camada	Baixo → deposição insuficiente
Ni ²⁺ / Mn ²⁺	Modificação da estrutura (tricatiônico)	Variação de desempenho

Fonte: Adaptado Handbook

A relação entre acidez livre e acidez total (Tabela 17) é um dos principais indicadores do estado do banho, pois representa o equilíbrio entre a capacidade reativa e a reserva química do sistema.

Tabela 17: Interpretação da relação AL/AT

Relação AL/AT	Condição do banho	Efeito no processo
Baixa	Banho pouco reativo	Camada fina / formação lenta
Ideal	Sistema equilibrado	Camada uniforme e estável
Alta	Banho agressivo	Cristal irregular / ataque

Fonte: Adaptado Handbook

O ferro dissolvido é gerado pela própria reação do processo e atua como um dos principais indicadores de envelhecimento do banho. Se a concentração for alta, pode resultar no aumento da formação de lodo, redução da eficiência do processo, variações na qualidade da camada.

O controle químico deve ser realizado de forma sistemática, considerando:

- frequência de análise adequada ao volume de produção
- reposição controlada de componentes
- monitoramento de tendências

- prevenção de contaminações

7.2.3 Cinética e formação de cristais

A formação da camada fosfatada é governada pela cinética de nucleação e crescimento cristalino, sendo diretamente influenciada pelas condições químicas e operacionais do processo.

O equilíbrio entre nucleação e crescimento determina tamanho de cristal, a densidade da camada, a uniformidade do revestimento e o desempenho anticorrosivo:

- **Baixa nucleação:** taxa de nucleação baixa, crescimento cristalino alto, formando cristais grandes.
- **Equilibrado:** taxa de nucleação moderada e crescimento moderado, resultando em uma estrutura uniforme.
- **Alta nucleação:** taxa de nucleação alta e crescimento controlado, formando uma estrutura microcristalina homogênea.

A temperatura exerce forte influência na reação de fosfatização, pois o aumento da temperatura eleva a velocidade das reações químicas envolvidas no processo, favorecendo a formação de cristais de maior tamanho na camada fosfatada. A presença de aceleradores no banho também afeta diretamente a reação, pois intensifica o processo de nucleação, resultando na formação de cristais mais finos e em uma camada mais homogênea. A etapa de ativação é responsável por definir os núcleos iniciais de cristalização na superfície do material, o que contribui para uma distribuição mais uniforme da camada fosfatada. Já o tempo de imersão no banho permite o crescimento dos cristais formados, influenciando diretamente a espessura da camada, que tende a se tornar mais espessa conforme o tempo de reação aumenta.

É necessária atenção especial na **formação de lodo na solução**, oriundo principalmente pela precipitação de fosfatos insolúveis, especialmente fosfato de ferro (FePO_4), resultante da dissolução do metal base, pois seu acúmulo afeta diretamente a estabilidade e eficiência do processo.

O ferro dissolvido promove a precipitação de fosfatos, contribuindo para o aumento de sólidos no banho. Os aceleradores favorecem a oxidação do ferro, levando à formação de partículas. Já a contaminação pode provocar reações secundárias, resultando em instabilidade química do sistema.

Para evitar esse problema, recomenda-se realizar a sangria ou a renovação parcial da solução. Temperaturas muito altas também influenciam o processo, pois aceleram excessivamente as reações

químicas, sendo necessário realizar ajustes operacionais para manter o controle do banho. A baixa eficiência de filtração favorece o acúmulo de partículas e impurezas no sistema, tornando importante a implementação ou melhoria do sistema de filtração. Além disso, o tempo de uso prolongado do banho pode levar ao seu envelhecimento, reduzindo a eficiência do processo, o que exige renovação parcial periódica da solução.

7.3 Aplicações industriais

A fosfatização é utilizada como camada intermediária em diversos sistemas industriais, atuando na proteção anticorrosiva e na melhoria da aderência de revestimentos:

- **Pintura automotiva:** utilização de fosfato tricatiônico ou de zinco, proporcionando alta resistência à corrosão e melhor aderência da pintura.
- **Linha branca:** aplicação de fosfato de ferro, priorizando menor custo e maior produtividade no processo.
- **Fixadores:** uso de fosfato de zinco para aumentar a proteção anticorrosiva dos componentes.
- **Engrenagens:** fosfato de manganês empregado para promover redução do desgaste durante a operação.
- **Conformação:** fosfato de zinco utilizado para favorecer a retenção de lubrificantes e melhorar o desempenho na conformação mecânica.

Quando utilizado como base para pintura, atua promovendo aderência mecânica entre o substrato metálico e o revestimento orgânico, contribuindo para a redução da corrosão sob o filme de tinta. No caso da lubrificação, a estrutura porosa da camada fosfatada permite a retenção de óleo, o que favorece a redução do atrito entre superfícies metálicas. Na proteção anticorrosiva, o revestimento funciona como uma barreira física que dificulta o contato do metal com agentes agressivos do meio, aumentando a durabilidade do material. Já em processos de conformação, a camada fosfatada reduz o contato direto entre superfícies metálicas, diminuindo o atrito e, conseqüentemente, o desgaste das ferramentas utilizadas no processo.

7.4 Ensaios de revestimento

A avaliação do revestimento fosfatado é realizada por ensaios de massa, morfologia, aderência e desempenho anticorrosivo:

- **Peso de camada:** determinado por método gravimétrico, utilizado para medir a massa do revestimento por área (g/m^2).
- **Morfologia:** avaliada por microscopia, permitindo observar a estrutura e o tamanho dos cristais formados.
- **Aderência:** verificada por ensaios mecânicos, utilizados para avaliar a fixação da camada ao substrato.
- **Resistência à corrosão:** analisada por ensaio de névoa salina, empregado para avaliar o desempenho anticorrosivo do revestimento.
- **Uniformidade:** avaliada visualmente para identificar falhas, descontinuidades ou variações na camada formada.

A seleção dos ensaios deve estar alinhada com a função do revestimento:

- em aplicações como base para pintura, a aderência e a uniformidade são críticas
- em aplicações anticorrosivas, o peso de camada e o desempenho em névoa salina são prioritários
- em aplicações funcionais (como desgaste), a morfologia da camada assume maior relevância

A interpretação dos resultados deve considerar as condições de processo e a variabilidade operacional, sendo recomendada a correlação com os parâmetros químicos e operacionais do sistema.

A análise de falhas (Tabela 18) deve considerar tanto os parâmetros operacionais quanto o estado químico do banho.

Tabela 18: Defeitos, diagnóstico e ação corretiva

Falha	Diagnóstico técnico	Ação corretiva
Camada inexistente	Falha de limpeza	Revisar pré-tratamento
Camada fina	Baixa reatividade	Ajustar AL/AT
Cristal grosso	Baixa nucleação	Ajustar ativação
Mancha	Lavagem deficiente	Melhorar lavagem
Baixa resistência	Composição inadequada	Ajustar banho
Excesso de lodo	Ferro elevado	Sangria / filtração

Fonte: Adaptado Handbook

É importante destacar que os parâmetros operacionais e químicos apresentados neste capítulo representam faixas típicas de referência. Na prática industrial, esses parâmetros podem variar de acordo com:

- o fornecedor do processo químico
- a formulação específica do banho
- o tipo de aplicação e requisitos do cliente
- as características da linha de processo

Dessa forma, a operação do processo deve sempre estar alinhada às recomendações do fabricante químico, sendo o boletim técnico e as instruções de processo documentos mandatórios para definição de faixas operacionais, limites de controle químico e procedimentos de ajuste e manutenção do banho.

O desempenho e a confiabilidade do processo dependem diretamente do cumprimento dessas diretrizes, aliado ao controle adequado das etapas de pré-tratamento, das condições operacionais e do monitoramento contínuo do sistema.

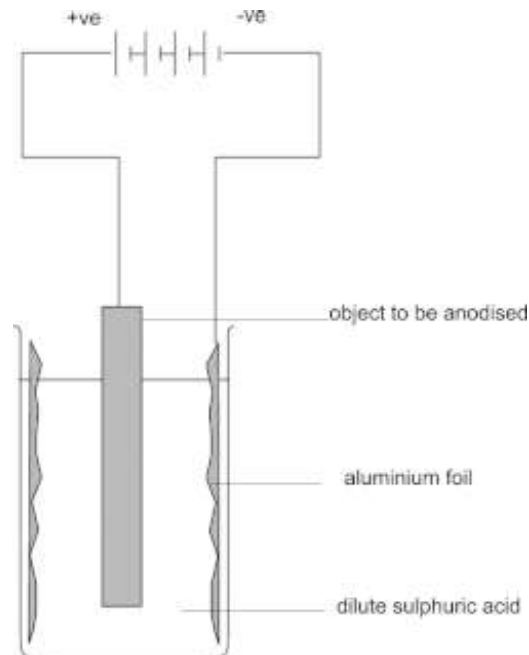
8. ANODIZAÇÃO DE LIGAS DE ALUMÍNIO

O processo de anodização do alumínio consiste na formação controlada de uma camada de óxido sobre a superfície metálica, obtida por meio de eletrólise. Essa camada apresenta características como elevada aderência, dureza e porosidade controlada, sendo amplamente utilizada para fins decorativos e de proteção contra corrosão. A dureza típica da camada pode variar entre 300 e 500 HV, dependendo das condições de processo.

Diferentemente da galvanoplastia, a peça a ser anodizada é conectada ao polo positivo (+) da fonte de corrente contínua, tornando-se o ânodo (Figura 20). A formação da camada anódica ocorre por crescimento do óxido a partir do próprio substrato metálico, diferentemente de revestimentos depositados, o que confere elevada aderência e estabilidade ao sistema.

A composição da liga tem papel decisivo: influencia a espessura obtida, a uniformidade da camada e a aparência final (brilho, tonalidade, tendência a manchas). Por isso, conhecer a série de liga é o primeiro passo para definir o processo de anodização.

Figura 20: Esquema simplificado de uma célula de anodização de alumínio

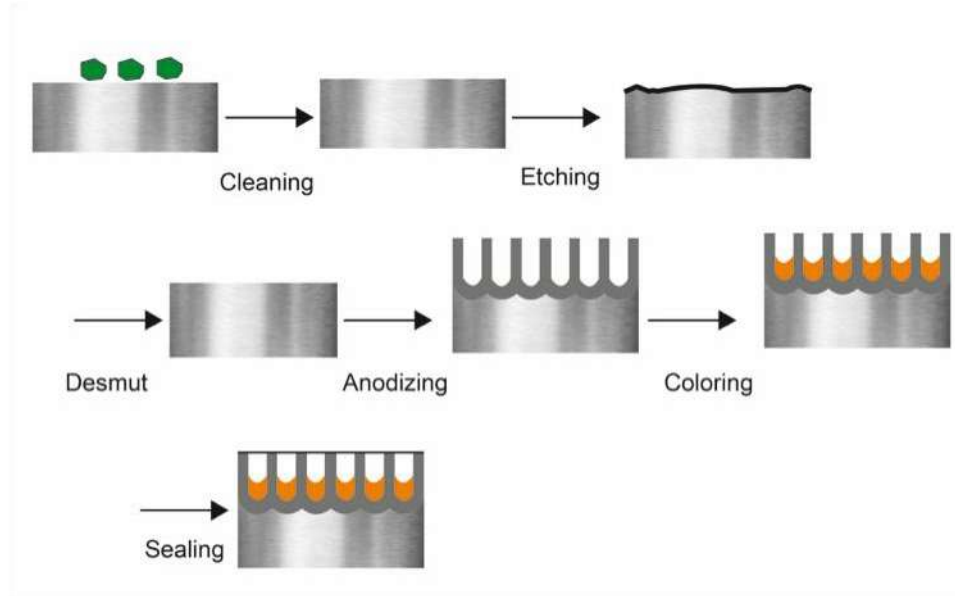


Fonte: Adaptado de Anodising Diagram. Wikimedia Commons (2010)

A camada anodizada apresenta duas regiões distintas: uma camada barreira, fina e compacta, diretamente aderida ao substrato, e uma camada porosa, com estrutura colunar aproximadamente

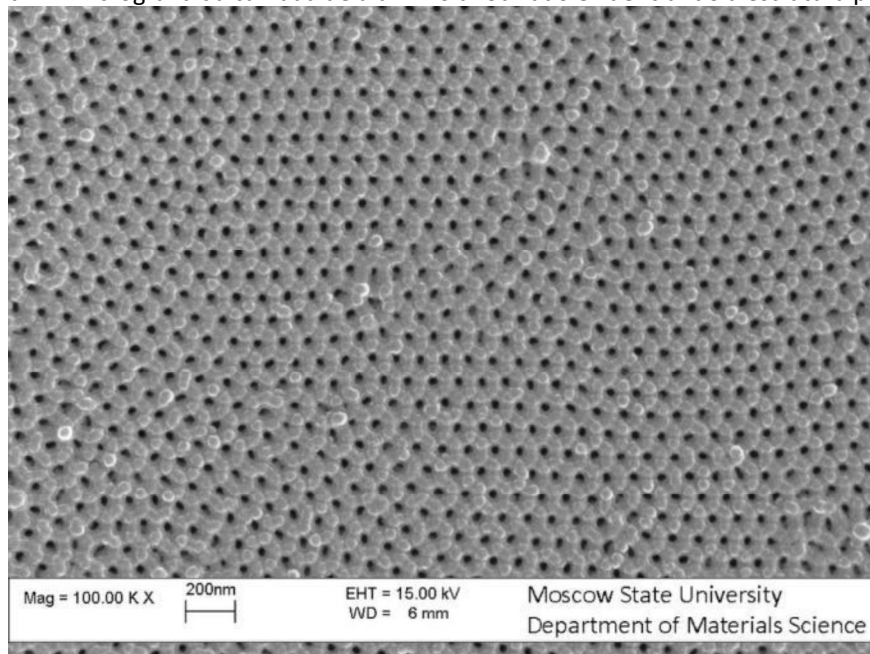
hexagonal. Essa estrutura porosa é essencial, pois permite a incorporação de corantes ou depósitos metálicos, viabilizando diferentes métodos de coloração (Figuras 21 e 22).

Figura 21: Estrutura esquemática da camada anodizada (barreira + porosa).



Fonte: Adaptado de ASM Handbook.

Figura 22: Micrografia da camada de alumínio anodizado evidenciando a estrutura porosa.



Fonte: Adaptado de Anodized Aluminium Sem. Wikimedia Commons (2014).

8.1 Tipos de ligas

A resposta à anodização varia significativamente conforme a composição da liga. Ligas da série 1000 apresentam excelente desempenho devido à elevada pureza do alumínio, enquanto ligas das séries 2000 e 7000 podem apresentar comportamento inferior devido à presença de intermetálicos ricos em cobre ou zinco. Ligas da série 5000, com teores elevados de magnésio, podem apresentar escurecimento localizado, especialmente quando o teor de Mg ultrapassa 3–4%.

Alumínio puro série 1000: apresenta alta pureza, geralmente superior a 99% de alumínio, e excelente resposta ao processo de anodização, formando camadas transparentes, homogêneas e esteticamente agradáveis. O pré-tratamento normalmente envolve desengraxe alcalino leve seguido de desoxidação para remover óxidos e contaminantes da superfície. A espessura da camada anódica costuma variar de 5 a 25 μm em aplicações decorativas, podendo atingir cerca de 50 μm em usos industriais. Esse material é amplamente utilizado em componentes arquitetônicos aparentes, utensílios domésticos, placas, letreiros e peças decorativas.

Ligas série 3000 (Al–Mn): As ligas de alumínio da série 3000 (Al–Mn) contêm adição de manganês, apresentando boa resistência à corrosão e boa resposta ao processo de anodização, resultando em coloração final clara e uniforme. O pré-tratamento geralmente envolve desengraxe seguido de desoxidação, evitando remoção excessiva de material que possa causar manchas ou irregularidades. A espessura da camada anódica costuma variar entre 10 e 25 μm , dependendo da aplicação. Essas ligas são amplamente utilizadas em revestimentos arquitetônicos, painéis, fachadas e componentes da construção civil expostos ao ambiente.

Ligas série 5000 (Al–Mg): As ligas de alumínio com magnésio destacam-se pela elevada resistência à corrosão, sendo especialmente adequadas para ambientes marinhos ou com atmosfera salina. Entretanto, teores mais altos de magnésio (acima de aproximadamente 3 a 4%) podem favorecer o aparecimento de manchas mais escuras ou áreas sombreadas após a anodização. O pré-tratamento envolve desengraxe seguido de desoxidação com controle rigoroso de tempo, temperatura e composição da solução para evitar ataque excessivo ao material. A espessura da camada anódica geralmente varia de 15 a 25 μm em aplicações decorativas e arquitetônicas, podendo atingir cerca de 50 μm em condições mais agressivas. Essas ligas são utilizadas em estruturas da indústria naval, sistemas de transporte, fachadas externas e componentes expostos a ambientes severos.

Ligas série 6000 (Al–Mg–Si): As ligas de alumínio amplamente utilizadas em perfis extrudados para construção civil e setor automotivo apresentam boa resposta à anodização, embora a coloração final possa variar levemente conforme o teor de silício. O pré-tratamento geralmente inclui desengraxe, fosqueamento leve para uniformizar a superfície e posterior neutralização ácida para remover resíduos alcalinos. A espessura da camada anódica costuma ficar entre 15 e 25 μm , adequada para aplicações arquitetônicas e estruturais aparentes. Essas ligas são empregadas em esquadrias, fachadas, estruturas arquitetônicas, peças automotivas e mobiliário urbano.

Ligas série 2000 (Al–Cu) e 7000 (Al–Zn): As ligas de alumínio das séries 2000 e 7000 apresentam alta resistência mecânica e são utilizadas em aplicações estruturais críticas. Entretanto, são mais sensíveis à corrosão e podem apresentar coloração menos uniforme após anodização, devido à presença de cobre, zinco e magnésio na composição. Entre os principais desafios estão o surgimento de manchas, variações de cor entre peças do mesmo lote e maior sensibilidade a pequenas variações de processo. O pré-tratamento recomendado inclui decapagem química especial e limpeza rigorosa, sendo comum a aplicação de selagem reforçada para melhorar a resistência à corrosão. A espessura da camada anódica costuma variar entre 20 e 50 μm , frequentemente associada a proteções adicionais, como pinturas ou selantes, especialmente em aplicações aeroespaciais e em componentes estruturais de alto desempenho.

A tabela 19 mostra o comparativo e aplicações das ligas:

Tabela 19: Comparativo de ligas de alumínio para anodização

Série	Composição principal	Pré-tratamento recomendado	Espessura típica de camada (μm)	Aplicações usuais
1000	Alumínio puro ($\geq 99\%$)	Desengraxe e desoxidação	5–25 / até ~50	Arquitetura, utensílios, peças decorativas
3000	Al–Mn	Desengraxe e desoxidação controlada	10–25	Fachadas, painéis, revestimentos
5000	Al–Mg	Desengraxe e desoxidação com controle rigoroso	15–25 / até ~50	Indústria naval, transporte, fachadas externas

6000	Al–Mg–Si	Desengraxe, fosqueamento alcalino ou ácido leve e desoxidação	15–25	Esquadrias, estruturas arquitetônicas, componentes automotivos
2000	Al–Cu	Decapagem química especial e selagem reforçada	20–50 (com proteção adicional)	Aeroespacial, peças estruturais
7000	Al–Zn (geralmente Al–Zn–Mg)	Decapagem química especial e selagem reforçada	20–50 (com proteção adicional)	Aeroespacial, estruturas de alta performance

Fonte: Adaptado de ASM Handbook.

8.2 Etapas do processo


A etapa de **pré-tratamento** é fundamental para garantir a qualidade da camada anódica, sendo responsável pela remoção de contaminantes e pela preparação da superfície. A molhabilidade da superfície é um fator crítico, pois influencia diretamente a uniformidade da camada formada. Dependendo do produto desejado, são realizados **desengraxe**, conforme indicados no capítulo 2, e, também na Tabela 19 “Comparativo de ligas de alumínio para anodização”, sendo intercalados por águas de lavagem.

Caso a especificação seja para uma peça fosca, também é realizado o **fosqueamento**, seguido da **neutralização e desoxidação/desmut**.

O **fosqueamento** consiste num processo de pré-tratamento químico, geralmente alcalino, realizado antes da oxidação anódica propriamente dita. Seu principal objetivo é eliminar o brilho natural e o aspecto espelhado do metal, conferindo uma superfície fosca, uniforme e com textura suave.

Se a especificação for peça brilhante é realizado o **abrilhantamento**, que consiste no polimento, geralmente composto por uma solução de mistura de ácidos fortes, como fosfórico e nítrico.

Após o fosqueamento ou abrilhantamento é realizada a **desoxidação/desmut**, que consiste na imersão da peça em uma solução ácida (geralmente ácido nítrico, sulfúrico ou misturas) para remover um resíduo escuro composto por elementos de liga como ferro, silício e cobre e óxidos de alumínio.

 **Nota técnica:** A maioria das empresas considera os processos de desoxidação e desmut sinônimos para descrever a etapa do processo de eliminação de óxidos de alumínio e resíduos de liga de ferro, cobre e silício, porém alguns optam por considerar desoxidação e desmut processos diferentes, realizados em tanques separados com soluções diferentes, sendo desoxidação (eliminação de óxidos de alumínio) para peças abrílhantadas e desmut (eliminação de resíduos de liga de ferro, cobre e silício).

8.2.1 Banho ácido eletrolítico

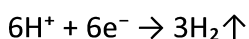
A anodização ocorre tipicamente em eletrólitos ácidos, como soluções de ácido sulfúrico, sob aplicação de corrente elétrica contínua.

As reações eletroquímicas fundamentais são:

Ânodo:



Cátodo:



Os parâmetros de anodização (densidade de corrente, temperatura, tempo, agitação, composição do eletrólito) devem ser ajustados à liga, à espessura desejada e ao tipo de aplicação. Para manter a temperatura controlada, é necessário que o banho possua um sistema de refrigeração eficaz.

Ensaio periódico de espessura de camada (por métodos destrutivos ou instrumentos não destrutivos), ensaios de selagem e inspeções visuais sistemáticas devem fazer parte da rotina de controle de qualidade. O controle de densidade de corrente é crítico para evitar queima ou camadas pulverulentas. O processo deve seguir as recomendações:

- Controlar rigorosamente os parâmetros elétricos (densidade de corrente, tensão) e químicos (concentração de ácido, temperatura, condutividade) do banho
- Manter o eletrólito limpo, com filtração e reposição periódica dos componentes, evitando acúmulo de impurezas metálicas e resíduos
- Registrar e controlar o tempo de permanência das peças no banho, para obter a espessura de camada de óxido especificada
- Realizar selagem adequada após a anodização, para aumentar a resistência à corrosão e reduzir a porosidade superficial da camada anódica

A camada anodizada apresenta espessura típica entre 5 e 25 μm para aplicações decorativas, podendo atingir valores superiores em aplicações técnicas. Os poros possuem diâmetro na faixa de 10 a 100 nm, com densidade da ordem de 10^9 a 10^{11} poros por cm^2 .

A organização aproximadamente hexagonal dos poros e seu crescimento perpendicular à superfície são determinantes para a eficiência dos processos subsequentes, como a coloração e a selagem.

Os valores a seguir representam faixas típicas para anodização em ácido sulfúrico (processo decorativo/arquitetônico, frequentemente chamado de “anodização sulfúrica”), apresentado na Tabela 20. Eles podem ser ajustados de acordo com:

- especificações de norma
- tipo de equipamento
- formulação do banho
- requisitos específicos do cliente ou da aplicação

No caso de ligas das séries 2000 e 7000, é comum a adoção de parâmetros diferenciados ou até de outros tipos de eletrólitos (por exemplo, ácido crômico), sobretudo no setor aeroespacial.

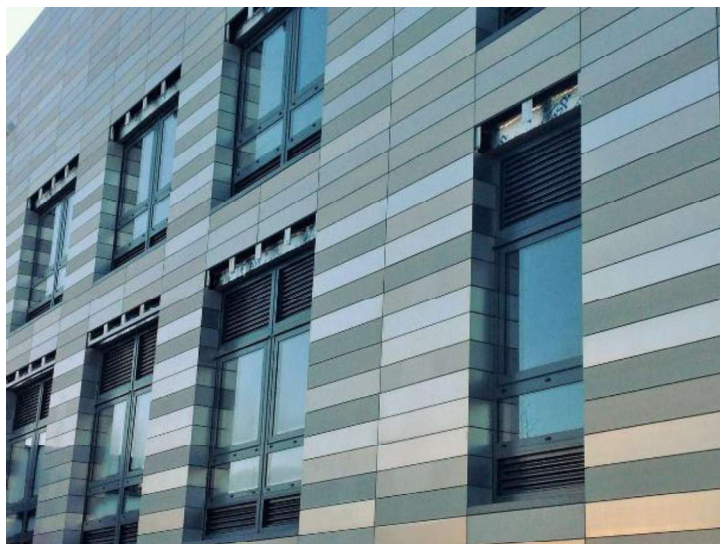
Tabela 20: Parâmetros técnicos típicos de anodização em ácido sulfúrico

Série	Eletrólito (banho de anodização)	Temperatura do banho ($^{\circ}\text{C}$)	Densidade de corrente (A/dm^2)	Tensão típica (V)	Tempo de anodização (min)
1000	Ácido sulfúrico 15–20%	18–22	1,2–1,5	12–18	20–40
3000	Ácido sulfúrico 15–20%	18–22	1,2–1,5	12–18	20–40
5000	Ácido sulfúrico 15–20%	18–20	1,0–1,3	12–16	25–45
6000	Ácido sulfúrico 15–20%	18–20	1,2–1,5	12–18	20–40
2000	Ácido sulfúrico 15–20%	18–20	1,0–1,2	12–16	30–50
7000	Ácido sulfúrico 15–20%	18–20	1,0–1,2	12–16	30–50

Fonte: Adaptado de ASM Handbook.

Para as séries 2000 e 7000, recomenda-se sempre consultar normas e especificações setoriais (especialmente as aeroespaciais) e, quando possível, o suporte técnico de fornecedores especializados. Em muitos casos são adotados processos em ácido crômico ou anodização do tipo “hard anodizing” (camadas mais espessas e duras), com condições de operação diferentes das mostradas na tabela 20.

Figura 23: Exemplos de perfis de alumínio anodizado em aplicação arquitetônica.



Fonte: Adaptado de Aluminium Fassade Anodized (2026)

8.2.2 Coloração

A coloração do alumínio anodizado é opcional, realizada para uniformidade dos perfis ou para fins decorativos.

Ligas com teores mais elevados de cobre, silício ou ferro podem apresentar tonalidades acinzentadas ou mais escuras após anodização. Quando a uniformidade de cor é crítica, como em fachadas de edifícios, recomenda-se selecionar ligas adequadas e manter controle rigoroso dos parâmetros de processo, além de padronizar o fornecedor de perfis e chapas.

A coloração por corantes baseia-se na absorção de espécies orgânicas ou inorgânicas nos poros da camada anodizada. O mecanismo envolve a difusão do corante para o interior dos poros, sua adsorção nas paredes do óxido e, posteriormente, a selagem, que promove seu aprisionamento.

A eletrocoloração é um processo eletroquímico no qual metais, como estanho, níquel ou cobalto, são depositados na base dos poros da camada anodizada. A deposição ocorre preferencialmente na base

dos poros e é controlada por parâmetros como tensão aplicada, frequência e composição do eletrólito, conforme a Tabela 21.

Tabela 21: Relação entre corante x critério de eletrodeposição

Critério	Corante (orgânica)	Eletrocoloração (metálica)
Variedade	Alta	Limitada
Resistência UV	Baixa–média	Alta
Durabilidade	Média	Alta
Aplicação	Decorativa	Arquitetônica

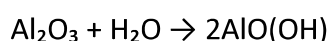
Fonte: Adaptado de ASM Handbook.

A coloração resulta da interação da luz com os depósitos metálicos, envolvendo fenômenos de absorção e interferência óptica.

8.2.3 Selagem

A selagem consiste na hidratação do óxido de alumínio, promovendo o fechamento dos poros e aumentando significativamente a resistência à corrosão.

A reação principal é:



Durante esse processo ocorre a formação de boehmita (mineral de óxido-hidróxido de alumínio), acompanhada de expansão volumétrica, fechamento dos poros e aprisionamento dos agentes de coloração.

A selagem pode ser realizada em água quente (95–100°C), a frio (com sais de níquel) ou em condições intermediárias. A escolha do método depende do equilíbrio desejado entre desempenho, custo e produtividade. A figura 24 apresenta o resultado de diferentes padrões (cores) após o tratamento superficial.

Figura 24: Aspecto superficial, evidenciando as várias cores obtidas pela anodização de alumínio, coloração e selagem



Fonte: Colorful Metal Hooks on White Background · Free Stock Photo

Os parâmetros de controle da selagem dos poros das camadas superficiais de material depositado são:

- Temperatura (20–100 °C): influencia diretamente a cinética do processo, afetando a velocidade das reações envolvidas na selagem
- Tempo (5–30 min): determina o grau de fechamento dos poros, sendo essencial para garantir a eficácia da selagem
- pH (5,5–6,5): deve ser mantido dentro dessa faixa para assegurar a estabilidade do processo
- Condutividade (controlada): o controle desse parâmetro contribui para manter a qualidade do revestimento

O desempenho final do sistema anodizado depende da integração entre a formação da camada, o método de coloração e a eficiência da selagem. Desvios em qualquer dessas etapas podem comprometer a resistência à corrosão, a estabilidade da cor e a durabilidade do revestimento.

Durante o processo de anodização, podem ser geradas névoas ácidas, especialmente em sistemas baseados em ácido sulfúrico. O controle dessas emissões deve atender às diretrizes da Norma Regulamentadora NR-15, que estabelece limites de exposição ocupacional para agentes químicos.

Adicionalmente, recomenda-se a adoção de medidas de controle baseadas em orientações técnicas da Fundacentro, incluindo ventilação local exaustora e monitoramento ambiental.

9. SAÚDE E SEGURANÇA OCUPACIONAL DO TRABALHADOR

9.1 Equipamentos de Proteção Individual (EPI) e Equipamentos de Proteção Coletiva (EPC)

Nas instalações de tratamentos de superfície, o uso adequado de Equipamentos de Proteção Individual (EPI) e Equipamentos de Proteção Coletiva (EPC) é essencial para a prevenção de acidentes e doenças ocupacionais.

A definição, seleção, fornecimento, uso e controle de EPIs devem estar em conformidade com a Norma Regulamentadora NR-06 – Equipamento de Proteção Individual, com as FDS (Ficha de Dados de Segurança) dos insumos utilizados e com as orientações do Serviço Especializado em Engenharia de Segurança e em Medicina do Trabalho (SESMT), quando existente.

Os EPIs mais comumente utilizados em instalações de tratamentos de superfície incluem, entre outros:

- **capacete de segurança**, com ou sem jugular, de acordo com os riscos de impacto e queda de objetos
- **óculos de segurança ou protetor facial** contra impacto e respingos químicos, selecionados conforme a natureza das operações (preparo de banhos, movimentação de soluções, lavagem etc.)
- **proteção auditiva** (protetores auriculares tipo plug ou concha) em áreas com níveis de pressão sonora acima dos limites de tolerância estabelecidos pela NR-15 – Atividades e Operações Insalubres
- **luvas de segurança** resistentes a agentes químicos, térmicos e mecânicos, escolhidas em função do produto químico e da temperatura de operação (luvas específicas para ácidos, bases, solventes e luvas térmicas para manipulação de materiais aquecidos)
- **vestimentas de proteção térmica e antichama**, especialmente em operações próximas à cuba de tratamentos de superfície a quente, onde há risco de projeção de metal fundido e temperaturas elevadas
- **aventais de PVC** ou de outros materiais compatíveis com os agentes químicos presentes, para proteção de tronco e membros inferiores
- **calçados de segurança** com solado antiderrapante e resistente a óleos e produtos químicos, com biqueira de proteção, adequados aos riscos identificados

- **respiradores purificadores de ar** com filtros apropriados para névoas ácidas, fumos metálicos e partículas sólidas, tais como filtros do tipo P3 (classificação nacional) ou P100 (classificação internacional), conforme avaliação de riscos e recomendações constantes nas FDS.
- **coletes de alta visibilidade** para trabalhadores em áreas com trânsito de empilhadeiras e outros veículos industriais

A escolha dos EPIs deve ser precedida de análise de riscos, contemplando:

- agentes químicos (ácidos, bases, sais metálicos, névoas ácidas, cromatos etc.)
- físicos (ruído, calor, radiação não ionizante)
- biológicos (quando aplicável)
- ergonômicos e de acidentes

A escolha deve se dar em alinhamento com o Programa de Gerenciamento de Riscos (PGR, conforme NR-01 e NR-09) e com o Programa de Controle Médico de Saúde Ocupacional (PCMSO, conforme NR-07). A Figura 25 mostra um exemplo de EPI's utilizados.

Figura 25: Trabalhador em planta de galvanização utilizando EPIs típicos (capacete, óculos, respirador, luvas químicas, avental, calçado de segurança, proteção auditiva).



Fonte: imagem ilustrativa (banco de imagens gratuito/uso autorizado).

Entre os EPCs recomendados para instalações de tratamentos de superfície destacam-se:

- **sistemas de ventilação local exaustora** e/ou ventilação geral, projetados para a captura eficiente de névoas ácidas, fumos metálicos e vapores gerados nos processos, em conformidade com a NR-09, NR-15 e normas técnicas de ventilação industrial

- **barreiras físicas antirrespingos** e proteções perimetrais ao redor de cubas de tratamentos de superfície a quente, tanques de tratamento e áreas de movimentação de cargas
- **chuveiros de emergência e lava-olhos** em número e localização adequados, devidamente sinalizados, desobstruídos e periodicamente testados, em conformidade com normas técnicas específicas
- **sinalização de segurança padronizada** (NR-26), incluindo identificação de riscos, rotas de fuga, áreas de circulação de pedestres, áreas de circulação de veículos, equipamentos de combate a incêndio, chuveiros de emergência, lava-olhos e saídas de emergência
- **sistemas de combate a incêndio**, tais como extintores dimensionados e distribuídos conforme a classe de incêndio, hidrantes, sprinklers e alarmes, em conformidade com a NR-23 – Proteção Contra Incêndios e com as Instruções Técnicas do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo

Como medida adicional de controle, é comum que o empregador restrinja o acesso a determinadas áreas da instalação, como por exemplo, região da cuba de tratamentos de superfície a quente, áreas de preparação de soluções químicas e depósitos de produtos perigosos, permitindo a entrada apenas de pessoas devidamente treinadas, autorizadas e, quando necessário, acompanhadas por profissional responsável. A figura 26 apresenta um resumo dos principais riscos.

Figura 26: Principais riscos de operações e unidades de galvanoplastia a frio e/ou a quente

TIPO DE RISCO	EXEMPLOS E AVALIAÇÃO	EPIs RECOMENDADOS	EPCs RECOMENDADOS	NORMAS CORRELATAS
	RESPINGO QUÍMICO Ácido, alcali, splines quonais	 • Óculos • Protetor Facial • Luvas e Avental Impermeáveis	 • Lava-olhos/Chuveiro • Contenção de Tanques	NR 06 NR 26 NR 15
	NÉVOA ÁCIDA/VAPORES TÓXICOS HCl, HF fumos	 Respirador com Filtro Químico	 • Sistema de Exaustão Local • Ventilação Geral	NR 15 NR 09 (AVALIAÇÃO E CONTROLE)
	CALOR EXCESSIVO Banhos de tomos alto temperatura	 • Vestimenta de proteção térmica • Luvas para calor	 • Climatização • Barreiras Térmicas	NR 15 (ANEXO III)
	RUÍDO ELEVADO Equipamento de operação	 Protetor Auditivo (plug/concha)	 • Enclausuramento de Fontes • Isolação acústica	NR 15 (ANEXO I e II)
	MOVIMENTAÇÃO DE CARGAS Transporto de material	 • Capacete • Calçado com Biqueira • Luvas resistentes	 • Pontes rolantes inspecionadas • Áreas de isolamento	NR 11
	ERROS DE OPERAÇÃO (QUEDAS/ESCORREGÕES)	 Calçado antiderrapante	 • Pisos com antiderrapante • Guarda-corpos • Passarelas	NR 08
	RISCOS ELÉTRICOS Como control do panel	 • Luvas isolantes • Calçado isolante	 • Disjuntores DR • Bloqueio de energia (LOTO)	NR 10
	RISCOS BIOLÓGICOS Água stagnantas	 Luvas descartáveis	 Higienização de tanques e instalações	NR 32 (adaptação)
	INCÊNDIO/EXPLOÇÃO (PRODUTOS INFLAMÁVEIS) Solvents, conventsi	 Traje anti-chama (onde aplicável)	 • Sistema de Detecção e Alarme • Extintores adequados	NR 23
	EXPOSIÇÃO A AGENTES ERGONÔMICOS Repetitive moves	(Menos aplicável, talvez cinta lombar - ver NR 17)	 • Postos de trabalho ajustáveis • Pausas e revezamentos	NR 17

Fonte: gerado por: Gemini (2026).

9.2 Procedimentos e condutas seguras

Ao trabalhar em uma planta de tratamento de superfície metálica, recomenda-se observar, entre outras, as seguintes orientações gerais de segurança:

- **ler, compreender e seguir todos os sinais e avisos** de perigo relacionados a riscos químicos, físicos, elétricos e mecânicos
- **respeitar a sinalização de segurança**, tais como placas de aviso, fitas zebreadas, cones e cartazes que alertam sobre riscos, delimitam áreas de circulação e orientam sobre procedimentos seguros
- **minimizar interações com empilhadeiras e outros veículos industriais**, mantendo-se em caminhos de pedestres previsíveis e devidamente sinalizados, ouvindo e observando atentamente a movimentação desses equipamentos, e estabelecendo contato visual com os operadores sempre que for necessário cruzar sua rota
- **não circular nem permanecer sob cargas suspensas**, em conformidade com as normas NR-11 – Transporte, Movimentação, Armazenagem e Manuseio de Materiais, e NR-12 – Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos
- **não permanecer próximo à cuba de tratamentos de superfície durante a imersão da peça**, em função do risco de projeções, respingos violentos e possíveis explosões decorrentes de umidade ou contaminantes presentes nas peças;
- **não tocar em peças tratadas** sem confirmação de que foram adequadamente resfriadas, pois podem manter temperaturas elevadas mesmo quando visualmente parecem frias;
- **evitar o estresse térmico** afastando-se da área da cuba sempre que possível, utilizando barreiras térmicas e respeitando pausas programadas, conforme diretrizes da NR-15 para exposição ao calor;
- **garantir a disponibilidade e o fácil acesso a chuveiros de segurança e lava-olhos**, que permitem lavagem imediata em caso de contato acidental com produtos químicos

Em caso de incêndio, utilizar extintores adequados à classe do fogo, observando:

- Classe A: incêndios em materiais sólidos combustíveis, como papel, madeira, plásticos e borrachas
- Classe B: incêndios em líquidos inflamáveis, como solventes, óleos e tintas

- Classe C: incêndios em equipamentos elétricos energizados
- Classe D: incêndios em metais pirofóricos (por exemplo, pós-metálicos especiais)
- Classe K (ou F): incêndios em óleos e gorduras de origem vegetal ou animal

A seleção, dimensionamento e posicionamento dos extintores devem estar de acordo com a NR-23 e com as normas do Corpo de Bombeiros (legislação estadual).

- **prever e manter kits de primeiros socorros** com itens básicos para atendimento inicial, bem como vestuário reserva em local acessível, para situações de contaminação de roupas por produtos químicos ou outros agentes
- **garantir que todos os trabalhadores recebam treinamentos específicos**, teóricos e práticos, sobre riscos químicos, elétricos, térmicos e mecânicos, uso correto de EPIs, procedimentos de emergência, combate a incêndios, manuseio e descarte seguro de produtos químicos e resíduos, em conformidade com a NR-01, NR-06, NR-09, NR-23 e demais normas correlatas, incluindo plano de evacuação, plano de emergência e capacitação de funcionários e brigadistas

9.3 Vigilância médica e emergências

A vigilância médica dos trabalhadores expostos a processos de tratamentos de superfície deve estar inserida no âmbito do Programa de Controle Médico de Saúde Ocupacional (PCMSO), previsto na NR-07, e integrada ao Programa de Gerenciamento de Riscos (PGR), previsto nas NR-01 e NR-09. Esse programa deve considerar a natureza dos agentes presentes (químicos, físicos e biológicos), suas intensidades e tempos de exposição.

Entre as ações recomendadas, destacam-se:

- **Exames médicos ocupacionais**

Devem compreender exames admissionais, periódicos, de retorno ao trabalho, de mudança de função e demissionais, contemplando, quando indicado pela avaliação de riscos:

- avaliação de exposição a metais, por meio de exames laboratoriais específicos (por exemplo, dosagem de metais no sangue ou em outros substratos biológicos), conforme o perfil de exposição e normas técnicas aplicáveis
- avaliação da função respiratória (espirometria), especialmente para trabalhadores expostos a névoas ácidas, fumos metálicos e outros aerossóis

- exame dermatológico, com atenção a sinais de dermatites de contato irritativas ou alérgicas, frequentemente relacionadas a produtos químicos utilizados em banhos de tratamentos de superfície

- monitoramento de possível exposição ao cromo hexavalente (Cr^{6+}) e a outros agentes classificados como carcinogênicos ou sensibilizantes, observando limites de tolerância estabelecidos em normas nacionais e recomendações de entidades técnicas reconhecidas

- **Vigilância epidemiológica interna**

Análise sistemática de dados de saúde dos trabalhadores (resultados de exames, afastamentos, queixas relacionadas ao trabalho), visa identificar tendências, antecipar problemas e subsidiar ações de prevenção.

- **Planos de emergência e resposta a incidentes**

As instalações devem dispor de planos de emergência formais, conhecidos por todos e periodicamente testados que incluam, no mínimo:

- procedimentos para contenção e neutralização de derramamentos de soluções ácidas, alcalinas e efluentes contendo metais, incluindo o uso de caixas de contenção, materiais absorventes, neutralizantes, equipamentos de proteção e destinação adequada dos resíduos gerados

- procedimentos para situações de incêndio, explosão, liberação de gases tóxicos e outros cenários de risco, com definição clara de rotas de fuga, pontos de encontro e mecanismos de comunicação interna e externa

- protocolos de atendimento a emergências médicas decorrentes de queimaduras térmicas e químicas, quedas, esmagamentos, intoxicações e outros acidentes, com definição de fluxos de encaminhamento a serviços de saúde.

A Figura 27 mostra um exemplo de plano de emergência.

Figura 27: Fluxograma de resposta a derramamentos químicos



Fonte: imagem gerada por: Gemini (2026)

9.4 Aspectos previdenciários

Determinadas atividades desenvolvidas em galvanoplastia, galvanização a quente e tratamentos de superfície podem caracterizar exposição a agentes nocivos em níveis que conferem direito a enquadramento de atividade especial para fins previdenciários. Nesses casos, é obrigatória a elaboração e manutenção atualizada de documentos técnicos específicos, tais como:

- **Laudo Técnico das Condições Ambientais do Trabalho (LTCAT)**

Documento elaborado por engenheiro de segurança do trabalho ou médico do trabalho habilitado, que descreve as condições ambientais, identifica agentes nocivos, avalia a exposição e subsidia o enquadramento de atividades especiais perante o INSS, conforme previsto no Regulamento da Previdência Social (Decreto nº 3.048/1999 e alterações).

- **Perfil Profissiográfico Previdenciário (PPP)**

Documento histórico-laboral, de caráter individual, que contém informações detalhadas sobre o trabalhador, as atividades desempenhadas, os agentes nocivos existentes, os resultados de monitoramento ambiental e de saúde, e a existência de EPCs e EPIs eficazes. O PPP é exigido para requerimentos de aposentadoria especial e outros benefícios.

A correta elaboração, guarda e atualização do LTCAT e do PPP contribui para a proteção dos direitos previdenciários dos trabalhadores e para a segurança jurídica das empresas.

10. CONSTITUIÇÃO DA EMPRESA E LICENCIAMENTOS

A implantação de uma empresa voltada à galvanização, eletrodeposição e tratamento de superfícies metálicas exige uma abordagem integrada desde o início.

Trata-se de uma atividade industrial com uso de processos químicos, geração de resíduos perigosos e potenciais impactos ambientais, sendo classificada como atividade potencialmente poluidora conforme a Política Nacional do Meio Ambiente (Lei nº 6.938/1981).

10.1 Definição dos processos e escopo técnico

O primeiro passo para a implantação do empreendimento é definir claramente quais processos serão realizados, pois essa definição determina o porte do empreendimento, o potencial poluidor, as exigências de licenciamento, os requisitos de segurança e a complexidade dos sistemas de tratamento de efluentes.

Cada processo deve ser descrito em memorial técnico contendo, no mínimo:

- fluxograma das etapas operacionais (limpeza, desengraxe, decapagem, ativação, deposição, passivação, selagem, enxágues)
- insumos utilizados (ácidos, bases, sais metálicos, aditivos, surfactantes)
- pontos de geração de efluentes líquidos, resíduos sólidos e emissões atmosféricas
- riscos associados à saúde ocupacional e ao meio ambiente

As principais normas técnicas de referência para definição de qualidade e controle de processo incluem:

- ABNT NBR ISO 2081:2011 – Revestimentos eletrolíticos de zinco e ligas de zinco;
- ABNT NBR 15709:2009 – Galvanização por imersão a quente em peças de aço e ferro fundido;
- ABNT NBR 9800 – Projeto de sistemas de tratamento de efluentes líquidos industriais;
- normas internacionais, como a ASTM B633 – Standard Specification for Electrodeposited Coatings of Zinc on Iron and Steel, amplamente utilizada como referência de boas práticas.

Essas normas orientam a especificação de processos, critérios de aceitação e rotinas de controle de qualidade.

Uma vez definidos os processos e o escopo técnico, torna-se possível avançar para a escolha da localização adequada do empreendimento.

10.2. Localização do empreendimento

A viabilidade técnica e legal depende da escolha adequada do imóvel, considerando compatibilidade com o uso e ocupação do solo, existência de passivos ambientais e infraestrutura necessária.

Antes de investir em adequações físicas, é necessário confirmar que a atividade industrial é permitida no local, conforme:

- Lei nº 10.257/2001 (Estatuto da Cidade), que estabelece diretrizes gerais da política urbana
- legislação municipal de uso e ocupação do solo, planos diretores e leis específicas de zoneamento (por exemplo, no município de São Paulo, a Lei nº 16.402/2016 e suas atualizações)

O documento essencial é a Certidão ou Declaração de Uso e Ocupação do Solo, emitida pela prefeitura, além da verificação de possíveis passivos ambientais do terreno.

O imóvel deve possuir:

- pisos impermeáveis e bacias de contenção nas áreas de tanques e produtos químicos
- sistema de drenagem segregado (industrial e pluvial)
- área para instalação da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) e tanques de equalização
- área adequada para armazenamento de matérias-primas e resíduos
- sistema de exaustão e ventilação dimensionado conforme as emissões e exigências do Corpo de Bombeiros

Essa avaliação prévia evita retrabalhos estruturais e dificuldades no licenciamento.

Com o imóvel adequado e o cenário ambiental preliminarmente avaliado, o próximo passo é formalizar juridicamente a empresa.

10.3. Constituição legal da empresa

A formalização jurídica deve refletir corretamente as atividades desenvolvidas e inclui:

- registro do ato constitutivo na Junta Comercial
- obtenção de Cadastro Nacional da Pessoa Jurídica (CNPJ)

- inscrição estadual, quando pertinente
- inscrição municipal

A base legal é o Código Civil (Lei nº 10.406/2002). O objeto social deve ser redigido de forma técnica e abrangente para incluir galvanização, eletrodeposição, tratamento de superfícies e atividades correlatas.

Com a empresa regularmente constituída e o objeto social adequado, pode-se dar andamento ao processo de licenciamento ambiental.

10.4. Licenciamento ambiental

Regulado pela Resolução CONAMA nº 237/1997, o licenciamento ambiental ocorre em três etapas:

- **Licença Prévia (LP):** concedida na fase de planejamento, aprova a localização e a concepção do empreendimento, atestando a viabilidade ambiental e estabelecendo requisitos para as etapas seguintes

- **Licença de Instalação (LI):** autoriza a implantação física do empreendimento, inclusive obras civis, montagem de tanques, sistemas de exaustão e ETE, em conformidade com o projeto aprovado;

- **Licença de Operação (LO):** permite o início das atividades produtivas, após verificação do cumprimento das condicionantes estabelecidas na LP e na LI.

Cada estado pode detalhar esse fluxo em normas próprias, mas a estrutura básica LP–LI–LO permanece como referência nacional.

Os efluentes industriais gerados em galvanoplastia e processos correlatos são avaliados principalmente conforme:

- CONAMA nº 357/2005 – classificação dos corpos de água, que define as classes dos corpos receptores;

- CONAMA nº 382/2006 – limites para emissões atmosféricas fornos, banhos aquecidos e sistemas de exaustão)

Também devem ser observadas legislações estaduais e municipais.

A ETE é essencial no projeto de galvanização e anodização, pois remove metais pesados e ajusta parâmetros físico-químicos antes do lançamento ou reúso do efluente.

A ABNT NBR 9800 orienta sobre:

- dimensionamento de tanques de equalização, neutralização, coagulação, floculação, sedimentação e filtração
- escolha de tecnologias de tratamento químico, físico-químico ou biológico
- critérios de operação, manutenção, monitoramento e segurança

O projeto deve ser elaborado por profissional habilitado e seu funcionamento deve ser comprovado por análises periódicas.

10.5 Alvará de funcionamento

Emitido pela prefeitura, confirma que a atividade é compatível com o uso do solo e que foram atendidas exigências urbanísticas, sanitárias, construtivas, de acessibilidade e cadastro tributário municipal. Esse documento, em geral, está associado ao cumprimento de requisitos de segurança, acessibilidade, regularidade construtiva e cadastro tributário municipal.

10.6 Auto de Vistoria do Corpo de Bombeiros (AVCB)

A obrigatoriedade do AVCB (Auto de Vistoria do Corpo de Bombeiros) é regulamentada por legislações estaduais e normas do Corpo de Bombeiros. Em São Paulo, o Decreto nº 63.911/2018 (atualizado pelo Decreto nº 69.118/2024) institui o Regulamento de Segurança contra Incêndios, tornando o documento obrigatório para edificações comerciais, industriais, condomínios e áreas de risco.

Empreendimentos de galvanização devem obter o AVCB devido ao uso de produtos inflamáveis e corrosivos. As exigências podem incluir:

- sistemas de combate a incêndio (hidrantes, extintores, sprinklers, dependendo da área e do risco)
- saídas de emergência e rotas de fuga devidamente sinalizadas
- sistemas de alarme, detecção de incêndio e iluminação de emergência
- armazenamento seguro de produtos inflamáveis e corrosivos

10.7 Cadastro Técnico Federal do IBAMA

Empresas potencialmente poluidoras devem se registrar no Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras ou Utilizadoras de Recursos Ambientais (CTF/APP), conforme a Instrução Normativa IBAMA nº 06/2013. A ausência de cadastro pode gerar penalidades e dificuldades no licenciamento.

10.8 Licença para produtos controlados

Produtos químicos controlados exigem registro ou licença junto a órgãos fiscalizadores, como Polícia Civil, Polícia Federal e Exército.

- **Polícia Civil (SP):**

Conforme o Decreto nº 6.911/1935, a fiscalização no Estado de São Paulo é realizada pela Divisão de Produtos Controlados (DPC) da Polícia Civil. A Portaria DPC nº 03/2008 regula os procedimentos para obtenção de alvará e Certificado de Vistoria para atividades com produtos controlados, incluindo fabricação, armazenamento, comércio, manipulação, transporte e uso.

- **Polícia Federal:**

A Lei nº 10.357/2001 estabelece normas de controle de produtos químicos que possam ser usados na produção ilícita de entorpecentes. O licenciamento ocorre mediante Certificado de Licença de Funcionamento ou Autorização Especial, conforme a Portaria nº 240/2019 e orientações complementares.

- **Exército Brasileiro:**

O controle de produtos químicos de características explosivas ou utilizados na fabricação de explosivos é regido pelo Decreto nº 10.030/2019 e pela Portaria nº 118/2019 do Ministério da Defesa. O registro é formalizado por Título de Registro (TR) ou Certificado de Registro (CR), com validade de até três anos.

10.9 Ficha de Dados de Segurança - FDS

Toda empresa que fabrica e/ou importa e/ou distribui produtos químicos (substâncias ou preparados) é obrigada a elaborar e disponibilizar a FDS. É um documento em que os usuários do produto poderão obter as informações quanto à composição química, propriedades físico-químicas,

proteção, segurança, saúde e meio ambiente, bem como as orientações quanto às medidas de segurança para a sua manipulação.

A FDS atende às determinações estabelecidas pela Organização Internacional do Trabalho (OIT) que, por meio da Convenção 170, promulgada pelo Decreto nº 2.657, de 03 de julho de 1998, trata da segurança na utilização de produtos químicos no trabalho.

Considerando que a Norma Regulamentadora – NR 26 – Sinalização de Segurança, estabeleceu que os produtos químicos utilizados nos locais de trabalho devem ser classificados quanto aos perigos para a segurança e a saúde dos trabalhadores, de acordo com os critérios estabelecidos pelo GHS (Sistema Globalmente Harmonizado de Classificação e Rotulagem de Produtos Químicos), é importante que as FDSs estejam no local de trabalho.

⚠ Nota de segurança: *No caso de acidentes, os telefones de emergência devem ser consultados na FDS conforme o tipo de produto químico alvo do sinistro. Outros telefones úteis:*

- **192 - SAMU:** *Para atendimento médico de urgência.*
- **193 - Bombeiros:** *Em caso de acidentes graves, incêndios ou necessidade de desencarceramento*
- **Ceatox/CIATox (Centro de Informação e Assistência Toxicológica): 0800 722 6001:** *casos de intoxicação (se for grave dirigir-se para um hospital)*
- **190 - Polícia Militar:** *Para acidentes com vítimas ou necessidade de isolar a via em vias urbanas*
- **191 - Polícia Rodoviária Federal (PRF):** *Para acidentes em rodovias federais*
- **199 – Defesa Civil:** *situações de risco iminente à vida, ao patrimônio ou ao meio ambiente*

11. REGULARIZAÇÃO JUNTO AO CRQ-SP

A legislação para empresas que fabricam ou exploram serviços para os quais são necessárias atividades de químico determina o registro da pessoa jurídica no Conselho Regional de Química e a indicação de um profissional habilitado da área química para assumir a Responsabilidade técnica.

O processo de registro da empresa e a indicação do Responsável Técnico, bem como a legislação atendida, está disponível em <https://crqsp.org.br/registro-de-empresa/>.

O CRQ-SP oferece gratuitamente um curso de esclarecimento sobre as atribuições da Responsabilidade Técnica aberto ao público em geral. O curso está disponível em https://www.even3.com.br/crqsp_entendendoaresponsabilidadetecnica-398006/.

De acordo com o artigo 350 do Decreto-Lei nº 5.452, de 1º de maio de 1943 (CLT), o Profissional da Química deve comunicar ao Conselho Regional de Química, em 24 horas e por escrito, quando assumir a Responsabilidade Técnica por uma atividade ou um empreendimento que exija conhecimento na área da química.

Caso o profissional não possua autonomia em relação a todas as atividades da área da Química, ele deverá comunicar ao CRQ quais os limites de abrangência de sua responsabilidade. Nesse caso, a empresa deverá contar com mais de um Profissional da Química como Responsável Técnico.

Mais informações sobre Responsabilidade Técnica estão disponíveis na página <https://crqsp.org.br/tipos-de-pessoa-juridica-sujeitas-a-fiscalizacao/>.

11.1 Abrangência da Responsabilidade Técnica

A Responsabilidade Técnica possui abrangência sobre todas as atividades que exijam conhecimento da química para serem executadas, tais como:

- assuntos regulatórios e exigências legais
- segurança química e operacional
- processos produtivos
- controle de qualidade e resultados analíticos
- padrões de qualidade e identidade
- rotulagem, fracionamento e reembalagem

- elaboração de procedimentos operacionais
- infraestrutura
- importação de produtos químicos
- estocagem (armazenamento adequado)
- área ambiental (tratamento e destinação adequada de resíduos)
- utilidades
- prestação de serviços na área química
- publicidade na área química

A Responsabilidade Técnica tem vigência 24 horas por dia, sete dias por semana, independentemente do horário de trabalho do Responsável Técnico.

O novo Código de Ética dos Profissionais da Química foi criado por meio da Resolução nº 311, de 21/09/2023, do Conselho Federal de Química, e está em vigor desde 31 de março de 2024.

O instrumento estabelece princípios e normas em relação à profissão, atualizando conceitos e definindo os direitos, deveres, vedações, infrações e penalidades referentes ao exercício profissional na área da química. Disponível em: <https://crqsp.org.br/codigo-de-etica/>.

12. TRATAMENTO DE EFLUENTES

Os processos de anodização do alumínio e de galvanoplastia geram correntes líquidas complexas, contendo metais dissolvidos, sais inorgânicos, ácidos, álcalis, surfactantes, agentes complexantes, óleos e graxas e, em alguns casos, cianetos e compostos fluorados e de cromo hexavalente.

O lançamento inadequado desses efluentes pode causar toxicidade em organismos aquáticos, degradar corpos d'água, contaminar solos e gerar passivos ambientais. Por estes motivos, o tratamento físico-químico, a gestão do lodo e o reaproveitamento devem integrar o processo produtivo.

Caracterização dos efluentes

A caracterização dos efluentes deve considerar não apenas a concentração de contaminantes, mas também a origem de cada corrente, a variabilidade de vazão, o regime de operação da linha e a presença de substâncias capazes de interferir na precipitação ou na separação sólido-líquido. Em termos práticos, a segregação na fonte costuma ser decisiva para a eficiência global do sistema de tratamento.

Do ponto de vista analítico, recomenda-se monitorar, no mínimo, pH, temperatura, condutividade, sólidos suspensos, demanda química de oxigênio (DQO), metais dissolvidos e metais totais, além de parâmetros específicos em função do processo, como cianeto, cromo hexavalente, fluoreto, óleos e graxas e potencial de oxirredução (ORP) quando houver etapas redox.

Efluentes típicos da anodização do alumínio

No caso da anodização do alumínio, os efluentes são gerados principalmente nas etapas de desengraxe alcalino, ataque químico, desoxidação (*desmut*), anodização, coloração, selagem e enxágues. Em linhas gerais, essas correntes apresentam alcalinidade residual, óleos e graxas, tensoativos, sais de alumínio, óxidos removidos, ácidos minerais, sulfatos e, conforme a rota tecnológica adotada, fluoretos. Nas etapas subsequentes de anodização e enxágues, são comuns acidez residual, condutividade elevada e arraste de espécies dissolvidas. Nas operações de coloração e selagem, podem ocorrer sais metálicos específicos, aditivos e compostos auxiliares de processo.

Efluentes típicos da galvanoplastia

Na galvanoplastia, os efluentes refletem a diversidade dos banhos empregados e das sequências operacionais adotadas. É comum a geração de correntes oriundas de banhos ácidos ou alcalinos contendo níquel, cobre, zinco, estanho ou ligas metálicas, além de enxágues com elevada variabilidade composicional.

Em determinadas linhas, podem existir correntes contendo cromo hexavalente, cuja remoção exige etapa prévia de redução a cromo trivalente. Também podem ocorrer linhas cianídricas, nas quais a oxidação do cianeto em cianato **deve ser conduzida em corrente segregada de efluentes ácidos**. A presença de complexantes orgânicos, quelantes e aditivos de processo tende a dificultar a precipitação convencional de metais, ocasionada pela variação de pH e, por isso, exige avaliação específica da rota de tratamento.

12.1 Etapas do processo de tratamento

Em instalações industriais, o desempenho do tratamento depende da combinação das operações de segregação de correntes especiais, **equalização, neutralização (ou correção de pH), precipitação química, coagulação, floculação, separação sólido-líquido** e, quando necessário, etapa de **polimento final do efluente**, que conste em operação complementar para reter contaminantes (Figura 28).

Figura 28: Exemplo de fluxograma com os passos gerais do tratamento de efluentes de anodização



Fonte: Autor

Segregação de efluentes

Soluções químicas e efluentes contendo cianetos e cromo hexavalente não devem ser encaminhadas diretamente ao tanque geral de neutralização. **No caso de cianetos, a prática operacional mais difundida consiste na oxidação alcalina em pH elevado, com controle cuidadoso do oxidante e do tempo de reação.** Para cromo hexavalente, o procedimento clássico consiste na redução a cromo trivalente em meio ácido, seguida de posterior ajuste de pH para precipitação do hidróxido correspondente.

A segregação destes efluentes reduz a ocorrência de reações indesejadas, melhora a previsibilidade operacional e evita que contaminantes críticos comprometam o desempenho da linha principal de tratamento, além de contribuir para a segurança do operador da ETE.

Equalização

O tanque de equalização tem a função de amortecer oscilações de vazão, concentração e pH, promovendo homogeneização e maior estabilidade do tratamento subsequente. Em sistemas industriais com produção intermitente, essa etapa é particularmente importante para evitar choques de carga no reator químico e na unidade de decantação.

Além de reduzir a variabilidade instantânea do efluente, a equalização favorece o controle de dosagem de reagentes e contribui para a melhoria da eficiência global do sistema.

Neutralização e precipitação química

A neutralização é realizada com reagentes alcalinizantes, como hidróxido de sódio ou cal hidratada, com o objetivo de atingir a faixa de pH em que a solubilidade do metal é mínima. Nessa condição, os íons metálicos formam hidróxidos insolúveis, que podem ser removidos por sedimentação, flotação ou filtração.

Para o alumínio, a reação simplificada pode ser representada por $\text{Al}^{3+} + 3\text{OH}^- \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_3$. Em termos operacionais, o controle de pH deve ser contínuo, pois muitos hidróxidos são anfóteros ou apresentam ressolubilização fora da faixa ótima. Além disso, a presença de complexantes pode exigir quebra química, aumento do tempo de reação ou combinação com outras rotas de tratamento.

Coagulação, floculação e separação sólido-líquido

Após a precipitação, a adição de coagulantes e polímeros floculantes promove a aglomeração de partículas finas em flocos maiores e mais densos. A eficiência dessa etapa depende do gradiente de mistura, da sequência de dosagem e da compatibilidade do polímero com a natureza do lodo.

A separação sólido-líquido pode ocorrer em decantadores, flotores, filtros prensa ou centrífugas, conforme o porte da unidade, a vazão tratada e a característica do resíduo gerado. Quando necessário, pode-se empregar uma etapa de **polimento final**, como filtração complementar, adsorção ou troca iônica, especialmente em sistemas sujeitos a limites mais restritivos de lançamento ou a metas internas de reúso.

Parâmetros operacionais de referência

Os valores apresentados na Tabela 22 devem ser compreendidos como faixas orientativas para controle operacional. Em escala industrial, a faixa ideal precisa ser validada por ensaios de bancada, testes de jarro (*jar test*) e acompanhamento analítico sistemático, uma vez que a composição do efluente e a presença de complexantes podem alterar significativamente o ponto ótimo de precipitação.

Tabela 22: Faixas operacionais de referência para precipitação química de espécies relevantes

Metal / espécie	Faixa típica de pH	Comportamento predominante	Observação operacional
Alumínio	6,0 a 7,5	Precipitação como $\text{Al}(\text{OH})_3$	Pode apresentar ressolubilização em meio excessivamente alcalino
Cromo (III)	7,5 a 9,0	Precipitação após redução prévia do Cr^{6+}	Verificar ORP e pH antes da neutralização final
Cobre	8,5 a 9,5	Boa remoção como hidróxido	Sensível à presença de complexantes orgânicos
Zinco	9,0 a 10,5	Precipitação eficiente em faixa alcalina	Pode exigir ajuste fino e maior tempo de floculação
Níquel	10,0 a 11,0	Precipitação mais difícil	Frequentemente demanda controle mais rigoroso e polimento final
Cianeto	Acima de 12,0	Oxidação alcalina em corrente segregada	Não deve ser misturado ao fluxo geral sem pré-tratamento adequado

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em BRAILE; CAVALCANTI (1993), DAVIS (2010), APHA; AWWA; WEF (2023) e no texto técnico revisado.

As faixas indicadas são orientativas e devem ser confirmadas por ensaios de bancada, testes de jarro e verificação analítica compatível com a composição real do efluente.

A confiabilidade do sistema depende de rotina analítica consistente, registros operacionais e resposta rápida a desvios. Em instalações maduras, o tratamento de efluentes é conduzido com base em indicadores de processo, e não apenas por correções pontuais após não conformidades.

Entre as práticas recomendadas, destacam-se: monitoramento contínuo de pH e, quando aplicável, de potencial de oxirredução nas etapas redox; registro do consumo de reagentes por metro

cúbico tratado e sua correlação com a carga contaminante; realização de testes de jarro (ensaio de bancada) para ajuste de coagulante e polímero quando houver alteração do efluente; e confirmação periódica da eficiência por análises de metais dissolvidos, sólidos suspensos, cianeto, cromo hexavalente, fluoreto e óleos e graxas, conforme a natureza do processo.

12.2 Geração, classificação e destinação do lodo

O principal resíduo sólido do tratamento físico-químico é o lodo, formado por hidróxidos metálicos, sais precipitados, partículas suspensas e água. Após espessamento e desidratação, apresenta alta concentração de contaminantes e deve ser classificado conforme a ABNT NBR 10004 e ensaios complementares quando necessários.

Em processos de anodização, o lodo é geralmente rico em compostos de alumínio, como hidróxidos, óxidos hidratados, aluminatos e, em alguns casos, compostos fluorados. Já na galvanoplastia, sua composição reflete os metais dos banhos, podendo aumentar o potencial de periculosidade, mas também permitir recuperação de materiais. O lançamento de efluentes deve atender à Resolução CONAMA nº 430/2011 e às exigências adicionais de órgãos estaduais, concessionárias e licenças ambientais.

As etapas usuais para manejo e destinação do lodo gerado no tratamento físico-químico são:

- **Espessamento:** tem como objetivo aumentar o teor de sólidos do lodo, utilizando equipamentos como tanque espessador, cone de lodo e sistemas de recirculação controlada
- **Desidratação:** visa reduzir a umidade e o volume do resíduo, podendo ser realizada por meio de filtro prensa, centrífuga ou bags de drenagem, dependendo da aplicação
- **Armazenamento temporário:** busca evitar a reumidificação e a dispersão do material, sendo realizado em área coberta, com piso impermeável, contenção adequada e identificação do resíduo
- **Destinação final:** deve assegurar a conformidade ambiental, podendo envolver aterro industrial licenciado, coprocessamento ou rotas de valorização tecnicamente validadas.

O cumprimento dos limites legais não dispensa o controle preventivo do processo. Em sistemas com metais bioacumulativos, como **chromo** e **níquel**, evitar desvios operacionais é tão importante quanto atender aos padrões de descarga. Os resíduos gerados nessas atividades — lodos de ETE com metais pesados, banhos exauridos, embalagens contaminadas e óleos usados — são, em geral, classificados como perigosos. A Tabela 23 mostra valores de referência regulatória conforme a Resolução CONAMA 430/2011.

Tabela 23: Valores de referência regulatória conforme a Resolução CONAMA 430/2011, usualmente adotados para lançamento de efluentes, sujeitos à confirmação legal aplicável

Parâmetro	Valor de referência	Comentário técnico
pH	5,0 a 9,0	Faixa geral de lançamento; confirmar exigências locais e setoriais
Cromo hexavalente	0,1 mg/L	Parâmetro crítico em razão da elevada toxicidade
Cromo total	0,5 mg/L	Deve ser avaliado em conjunto com a etapa de redução
Níquel	2,0 mg/L	Comum em linhas de niquelagem e em banhos de ligas
Zinco	5,0 mg/L	Relevante em galvanoplastia de zinco e processos correlatos
Cianeto total	0,2 mg/L	Exige segregação e oxidação prévia para cianato
Alumínio	10,0 mg/L	Particularmente relevante em efluentes de anodização
Cobre	1,0 mg/L	Associado a banhos de cobre e a ligas metálicas

Fonte: Adaptado da Resolução CONAMA nº 430/2011.

Órgãos ambientais estaduais e concessionárias de saneamento podem adotar valores mais restritivos, motivo pelo qual a verificação jurídica e regulatória local permanece indispensável.

Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) define diretrizes para sua gestão, incluindo responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, elaboração do **Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS)** e priorização da não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e destinação ambientalmente adequados.

Nesse contexto, empresas de tratamento de superfície metálica devem elaborar o PGRS com identificação dos resíduos e formas de destinação, manter cadastro de transportadores e destinadores licenciados, registrar a movimentação de resíduos perigosos conforme exigências ambientais e adotar medidas para reduzir a geração de lodo e banhos exauridos por meio de otimização de processos e segregação de correntes. Com essas práticas, torna-se possível organizar a implantação do empreendimento de forma tecnicamente estruturada.

12.3 Potencial de reaproveitamento de resíduos

Nos últimos anos, tem crescido o interesse pela valorização de resíduos industriais como forma de reduzir impactos ambientais, diminuir custos de disposição final e promover práticas de economia circular. No caso dos lodos provenientes do tratamento de efluentes de anodização, o potencial de reaproveitamento decorre, sobretudo, da presença de compostos de alumínio em concentrações significativas.

Entre as possibilidades descritas na literatura técnica, destacam-se a incorporação em massas cerâmicas (este também recebe resíduos de galvanoplastia), o emprego como aditivo mineral em materiais cimentícios, a utilização em composições refratárias e a recuperação de compostos de alumínio para aplicações em tratamento de águas. Contudo, a viabilidade dessas rotas depende de caracterização química detalhada, estabilidade do resíduo, ausência de contaminantes incompatíveis, avaliação de desempenho do produto e análise econômica da cadeia de reaproveitamento.

A fase líquida resultante do tratamento pode ser encaminhada para reuso nos próprios processos de tratamento.

Um outro produto que pode ser reaproveitado é o ácido clorídrico exaurido (subproduto gerado da decapagem), com aplicação no tratamento de efluentes, para a precipitação de ferro presente em cloreto férrico ou ferroso.

Assim, a valorização do resíduo e efluente não deve ser tratada como solução automática, mas como alternativa tecnicamente promissora que requer validação experimental, atendimento regulatório e análise de risco ambiental.

13. GLOSSÁRIO

Agente complexante – Substância que forma complexos estáveis com íons metálicos, reduzindo a eficiência da precipitação química convencional

Anfótero: espécie química que possui a capacidade de atuar tanto como um ácido quanto como uma base em reações químicas

AVCB – Auto de Vistoria do Corpo de Bombeiros

Cianeto: Espécie química altamente tóxica presente em alguns processos galvânicos, que exige tratamento redox específico.

Coagulação – Etapa em que se desestabilizam partículas finas e coloides por adição de reagentes apropriados.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

Decantação: Separação gravitacional em que os sólidos sedimentam e a fase líquida clarificada é removida.

Desmut – Etapa de remoção de resíduos insolúveis e contaminantes da superfície metálica após ataque químico

EPC – Equipamento de Proteção Coletiva

EPI – Equipamento de Proteção Individual

ETE – Estação de Tratamento de Efluentes

FDS – Ficha de Dados de Segurança

Floculação – Etapa posterior à coagulação, em que partículas desestabilizadas se agregam em flocos maiores.

Lodo – Resíduo sólido ou semissólido gerado no tratamento de efluentes, rico em precipitados e sólidos removidos.

LTCAT – Laudo Técnico das Condições Ambientais do Trabalho

MMO – Óxidos mistos de metais

ORP – Potencial de oxirredução; parâmetro utilizado para acompanhar reações de oxidação e redução.

Passivo ambiental – Responsabilidade por danos ambientais acumulados em uma área, resultantes de atividades passadas ou presentes.

Pitting (Pites) - Pequenos pontos de corrosão ou falhas no metal

PPP – Perfil Profissiográfico Previdenciário

Precipitação química – Conversão de espécies dissolvidas em compostos insolúveis, geralmente por ajuste de pH e dosagem de reagentes.

Segregação de correntes – Separação de efluentes por natureza química ou grau de periculosidade antes do tratamento.

Substrato – metal base que receberá o revestimento.

Quilatagem – unidade de pureza do ouro em ligas.

Tribologia - ciência que estuda o atrito, desgaste e lubrificação de superfícies em movimento relativo

14. REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 10004: resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ABNT. NBR 13343: anodização de alumínio e suas ligas – especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

ABNT. NBR 15709:2009. Galvanização por imersão a quente em peças de aço e ferro fundido.

ABNT. NBR 9800. Projeto de sistemas de tratamento de efluentes líquidos industriais.

ABNT. NBR ISO 2081:2011. Revestimentos eletrolíticos de zinco e ligas de zinco.

ABRACO. INTERCORR 2014 – Trabalho 173. Disponível em:

https://abraco.org.br/src/uploads/intercorr/2014/INTERCORR2014_173.pdf

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS. **Documentation of the Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices.** Cincinnati: ACGIH.

AMERICAN GALVANIZERS ASSOCIATION (AGA). **Inspector safety.** Disponível em:

<https://galvanizeit.org/inspection-course/inspector-safety>

AMERICAN GALVANIZERS ASSOCIATION (AGA). **The hot-dip galvanizing process.** Disponível em:

<https://galvanizeit.org/hot-dip-galvanizing/hdg-process>

AMERICAN GALVANIZERS ASSOCIATION (AGA). **What is hot-dip galvanizing?** Disponível em:

<https://galvanizeit.org/hot-dip-galvanizing/what-is-galvanizing>

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WATER ENVIRONMENT FEDERATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater.** 24. ed. Washington, DC: APHA, 2023.

ANODIZED aluminium adds a protective coating of aluminium oxide. Wikimedia Commons. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org>. Acesso em: 25 mar. 2026.

ANODIZED aluminium jump rings arp. Wikimedia Commons. Disponível em:

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Anodized_aluminium_jump_rings_arp.jpg. Acesso em: 25 mar. 2026.

ANTT. **Resolução nº 5.998/2022.**

ASM HANDBOOK: Volume 5: Surface Engineering. Editores: Catherine M. Cotell, James A. Sprague, Fred A. Smidt. Materials Park, OH: ASM International, 1994. 2535 p.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM B633 – Standard Specification for Electrodeposited Coatings of Zinc on Iron and Steel.

BERNADINELLI, Marcos Vinicius Lourenço. **Banho de ródio: o segredo para joias brilhantes e duráveis.** Aurhora, 2024. Disponível em: <https://www.aurhora.com.br/post/banho-de-rodio>. Acesso em: 30 jan. 2026.

BERNADINELLI, Marcos Vinicius Lourenço. **Metais nobres: quem são, o que são, onde vivem?** Aurhora, 2024. Disponível em: <https://www.aurhora.com.br/post/metais-nobres>. Acesso em: 23 out. 2025.

BRAILE, P. M.; CAVALCANTI, J. E. W. A. **Manual de tratamento de águas residuárias industriais.** São Paulo: CETESB, 1993.

BRASIL. Decreto nº 2.657, de 3 de julho de 1998. **Promulga a Convenção nº 170 da Organização Internacional do Trabalho (OIT) sobre segurança na utilização de produtos químicos no trabalho.** Diário Oficial da União: Brasília, DF, 6 jul. 1998.

BRASIL. **Decreto nº 3.048**, de 06 de maio de 1999.

BRASIL. **Decreto nº 3.665/2000 (R-105).** Regulamento para a fiscalização de produtos controlados.

BRASIL. **Decreto nº 10.030**, de 30 de setembro de 2019. Aprova o Regulamento para a Fiscalização de Produtos Controlados. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 1 out. 2019.

BRASIL. **Lei nº 2.800**, de 18 de junho de 1956. Cria o Conselho Federal e os Conselhos Regionais de Química.

BRASIL. **Lei nº 5.194**, de 24 de dezembro de 1966. Regula o exercício das profissões de engenheiro, arquiteto e engenheiro agrônomo.

BRASIL. **Lei nº 6.938**, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente.

BRASIL. **Lei nº 10.257**, de 10 de julho de 2001. Estatuto da Cidade.

BRASIL. **Lei nº 10.357/2001.** Controle de produtos químicos pela Polícia Federal.

BRASIL. **Lei nº 10.406**, de 10 de janeiro de 2002. Código Civil.

BRASIL. **Lei nº 12.305**, de 2 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos.

BRASIL. Ministério da Justiça e Segurança Pública. **Portaria MJSP nº 204/2022.**

BRASIL. Ministério do Trabalho. **Norma Regulamentadora NR 06** – Equipamento de Proteção Individual (EPI).

BRASIL. Ministério do Trabalho. **Norma Regulamentadora NR 07** – Programa de Controle Médico de Saúde Ocupacional (PCMSO).

BRASIL. Ministério do Trabalho. **Norma Regulamentadora NR 09** – Programa de Gerenciamento de Riscos (PGR).

BRASIL. Ministério do Trabalho. **Norma Regulamentadora NR 15** – Atividades e Operações Insalubres.

BRASIL. Ministério do Trabalho. **Norma Regulamentadora NR 23** – Proteção Contra Incêndios.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora nº 26 (NR-26)**: sinalização de segurança. Brasília, DF: Ministério do Trabalho e Emprego, atualizada.

BRASIL. **Portaria nº 3.214**, de 8 de junho de 1978. Normas Regulamentadoras de Segurança e Medicina do Trabalho.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CETESB. **Decisão de Diretoria nº 038/2017**.

CETESB. **Manual de gerenciamento de produtos químicos perigosos**. São Paulo: CETESB, 2021.

COLORFUL **metal hooks on white background**. Pexels. Disponível em: <https://www.pexels.com/>. Acesso em: 25 mar. 2026.

COMANDO LOGÍSTICO DO EXÉRCITO (COLOG). **Portaria nº 118/2019**.

CONAMA. **Resolução nº 237**, de 19 de dezembro de 1997.

CONAMA. **Resolução nº 357**, de 17 de março de 2005.

CONAMA. **Resolução nº 382**, de 26 de dezembro de 2006.

CONSELHO REGIONAL DE QUÍMICA – IV REGIÃO (CRQ-IV). **Publicações técnicas**. São Paulo: CRQ-IV. Disponível em: <https://crqsp.org.br/publicacoes>

CORPO DE BOMBEIROS DA POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Portaria nº 240**, de 2019. Estabelece procedimentos e instruções técnicas complementares para segurança contra incêndio. São Paulo: CBPMESP, 2019.

DAVIS, J. R. **Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance**. Materials Park, OH: ASM International, 2001.

DAVIS, M. L. **Water and wastewater engineering: design principles and practice**. New York: McGraw-Hill, 2010.

DIGGLE, J. W.; DOWNIE, T. C.; GOULDING, C. W. **Anodic oxide films on aluminum**. Chemical Reviews, v. 69, n. 3, p. 365–405, 1969.

DUARTE, I.; AMORIM, J. R.; PERÁZZIO, E. F.; SCHMITZ JR., R. **Dermatite de contato por metais: prevalência de sensibilização ao níquel, cobalto e cromo**. Anais Brasileiros de Dermatologia, v. 80, n. 2, p. 137–142, 2005.

EPEC / UFSC. **Tipos de extintores de incêndio e suas aplicações.** Disponível em: <https://epcc-ufsc.com.br/preventivo-contraincendios/tipos-de-extintores>

ESTADO DE SÃO PAULO. **Decreto nº 6.911/1935.**

FUNDAÇÃO JORGE DUPRAT FIGUEIREDO DE SEGURANÇA E MEDICINA DO TRABALHO (FUNDACENTRO). **Exposição ocupacional a névoas ácidas: orientações técnicas.** São Paulo: Fundacentro, 2018.

GALLARDO, A. **ESG – O que é e os impactos para a indústria de galvanização.** ABRACO, 2021. Disponível em: <https://abraco.org.br/abraco-cursos/galvanizacao2021/docs/esg-o-que-e-e-os-impactos-para-a-industria-de-galvanizacao-allain-gallardo.pdf>

GARCIA, J. C.; BURLEIGH, T. D. **The beginnings of gold electroplating.** *Electrochemical Society Interface*, v. 22, n. 3, p. 37–40, 2013.

HABAZAKI, H. et al. **Electrolytic coloring of anodized aluminum.** *Electrochimica Acta*.

IBAMA. **Instrução Normativa nº 06**, de 15 de março de 2013.

ICZ – Instituto de Metais Não Ferrosos. **GalvInfoNote 3.2 – Fundamentals of hot-dip galvanizing.** Disponível em: https://icz.org.br/upfiles/arquivos/GalvInfoNotes/GalvInfoNote_3_2.pdf

LIBRO BLANCO. **Fundamentos del galvanizado por inmersión.**

MARTINS, Roberto de Andrade. **Alessandro Volta e a invenção da pilha.** *Acta Scientiarum*, v. 21, n. 4, p. 823–835, 1999.

METCALF; EDDY et al. **Wastewater engineering: treatment and resource recovery.** 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2014.

NEBIOLO, W. P. **The history of electroplating and the evolution of NASF.** *NASF Surface Technology White Paper*, 2022.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Sistema Globalmente Harmonizado de Classificação e Rotulagem de Produtos Químicos (GHS).** Genebra: ONU.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO TRABALHO. **Convenção nº 170: segurança na utilização de produtos químicos no trabalho.** Genebra: OIT, 1990.

PAUNOVIC, M.; SCHLESINGER, M. **Fundamentals of Electrochemical Deposition.** 2. ed. Hoboken: Wiley, 2006.

POLÍCIA CIVIL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Portaria DPC nº 03/2008.**

PORTAL TRATAMENTO DE SUPERFÍCIE. **Conformidade legal ambiental na galvanoplastia.** Disponível em: <https://www.portaltts.com.br/conformidade-legal-ambiental-na-galvanoplastia>

REIS, Leila Garcia. **Tecnologia aplicada a processos galvânicos**. 1. ed. São Paulo: SENAI-SP Editora, 2015.

SANTOS, Wilma Ayako Taira dos. **Dez recomendações para dar banho nas bijuterias e joias folheadas**. Revista da ABTS, São Paulo, n. 221, p. 21–26, out. 2020.

SANTOS, Wilma Ayako Taira dos. **Investigação da citotoxicidade e resistência à corrosão de revestimentos eletrodepositados**. Dissertação (Mestrado) — IPEN/USP, 2011.

SCHLESINGER, M.; PAUNOVIC, M. (Ed.). **Modern Electroplating**. 5. ed. Hoboken: Wiley, 2010.

SCHUEPP, T.; RUNDE, M. **Anodizing of aluminum and its alloys**. In: ASM INTERNATIONAL. Surface engineering. Materials Park, OH: ASM International, 1994.

SCHWARZACHER, W. **Electrodeposition: a technology for the future**. Electrochemical Society Interface, v. 15, n. 1, p. 32–35, 2006.

SEM of AAO. Wikimedia Commons. Disponível em:

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SEM_of_AAO.jpg. Acesso em: 25 mar. 2026.

SIMON, Franz. **Alternativas para níquel em processos de eletrodeposição**. Revista da ABTS, São Paulo, n. 69, p. 16–24, jan. 1995.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DE PRODUTOS QUÍMICOS PARA FINS INDUSTRIAIS E DA PETROQUÍMICA NO ESTADO DE SÃO PAULO. **Manual de tratamento de efluentes industriais**. São Paulo: Sinproquim, 2007.

SÃO PAULO (Estado). **Decreto nº 63.911**, de 10 de dezembro de 2018. Regulamento de Segurança Contra Incêndio.

SÃO PAULO (Estado). **Lei nº 16.402**, de 22 de março de 2016. Parcelamento, uso e ocupação do solo.

UNIÃO EUROPEIA. **Diretiva 2011/65/UE** (RoHS 2).

UNIÃO EUROPEIA. **Norma EN 1811:2011+A1:2015**.

UNIÃO EUROPEIA. **Regulamento (CE) n.º 1907/2006** (REACH).

WERNICK, S.; PINNER, R.; SHEASBY, P. **The Surface Treatment and Finishing of Aluminium and Its Alloys**. Elsevier.

WORLD GOLD COUNCIL. **About gold: market structure and flows**. Disponível em:

<https://www.gold.org/about-gold/market-structure-and-flows>

WUNDT, K.; MANKAU, B. **Duração direta do aço inoxidável, uma alternativa?** Revista da ABTS, São Paulo, n. 16, p. 23–26, jul./ago. 1985.