

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ANA FLÁVIA CORNACINI

**REDUÇÃO DO CONSUMO DE ÁCIDO CRÔMICO NA GALVANIZAÇÃO DE
PEÇAS METÁLICAS**

LONDRINA

2022

ANA FLÁVIA CORNACINI

**REDUÇÃO DO CONSUMO DE ÁCIDO CRÔMICO NA GALVANIZAÇÃO DE
PEÇAS METÁLICAS**

Reduction of chromic acid consumption in galvanizing metal parts

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Guilherme Duenhas Machado.
Coorientador(a): Lucimara Lopes da Silva.

LONDRINA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

ANA FLÁVIA CORNACINI

**REDUÇÃO DO CONSUMO DE ÁCIDO CRÔMICO NA GALVANIZAÇÃO DE
PEÇAS METÁLICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 07/Dezembro/2022

Hélio Toshio Ujihara
Bacharelado em Engenharia Química
PADO AS Industria Comercial e Importadora

Patrícia Hissae Yassue Cordeiro
Doutorado em Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Guilherme Duenhas Machado
Doutorado em Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Lucimara Lopes da Silva
Doutorado em Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LONDRINA

2022

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer à minha família, o meu porto seguro, e os meus maiores apoiadores, que são meus pais, Neiva e Marcio, e meu irmão, Fernando. Sem eles nada disso seria possível, foram eles que facilitaram a minha trajetória até aqui e fizeram do impossível o possível para que eu realizasse o meu sonho. Agradeço principalmente ao meu irmão por toda sabedoria e toda a ajuda durante a escrita do meu trabalho, a minha maior inspiração. Em especial, a minha mãe, minha melhor amiga e minha maior incentivadora, foi ela quem esteve ao meu lado todos os segundos da minha graduação, sempre vendo o melhor lado de mim.

À minha avó Anadir, que sempre torceu por mim e que nunca deixou de acreditar no meu potencial. Ao meu avô João, que hoje não está mais presente entre nós, porém vivo em minha memória, dedico essa conquista a você.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Guilherme Duenhas Machado, por toda a ajuda fornecida e por me guiar durante esse processo. Agradeço também à minha coorientadora Prof. Dra. Lucimara Lopes da Silva, por ter abraçado essa ideia e me ajudado, dando as primeiras coordenadas para a elaboração do trabalho.

Aos meus amigos, que me apoiaram e me incentivaram a todo momento, principalmente à Fernanda Garcia, que me aconselhou, sempre afirmando que eu seria capaz. Ao meu companheiro, Lucas Alcantara, os meus sinceros agradecimentos, por todo apoio e companheirismo, obrigada pela compreensão, sem você tudo seria mais difícil.

Peço desculpa àqueles que não estão presentes em palavras, mas saibam que vocês, amigos e familiares, colaboradores da empresa, foram importantes nessa minha jornada, o apoio de todos vocês foram essenciais para que eu pudesse lidar com os desafios da graduação.

Por fim, agradeço a Deus por ter me dado forças para completar cada desafio dessa etapa da minha vida, por ter me mostrado que eu seria capaz mesmo quando achava que não conseguiria.

RESUMO

O processo de galvanização é usualmente utilizado em acabamentos de peças visando maior durabilidade através da aplicação de uma camada metálica por eletrodeposição. Em maçanetas, cadeados e componentes de montagem, é feita a galvanização com cromo decorativo, que confere uma finalização mais elegante para as peças. O cromo é um composto que quando encontrado em sua forma de oxidação trivalente é benéfico para a saúde, porém, em oxidação hexavalente, comumente utilizada na galvanoplastia, é tóxico e pode causar problemas para a saúde humana e o meio ambiente. O arraste do banho de cromo para as águas de enxágue causam um aumento na concentração de cromo hexavalente nas etapas seguintes, impactando diretamente na estação de tratamento de água e no consumo de insumos para repor a quantidade arrastada em um determinado período. Visando menor arraste de cromo e redução da névoa formada pelos gases na eletrodeposição, foi feita a aplicação de um novo surfactante, que em menor quantidade possui maior efeito. Através da medida da tensão superficial com a adição do tensoativo foi possível determinar o ponto de concentração micelar crítica (CMC) do surfactante e como o banho de cromo se comporta com essa alteração. Verificado que o tensoativo age diminuindo a tensão superficial sem interferir nas concentrações de ácido crômico presente no banho, foi feita a comparação da concentração de cromo na água de enxágue nos períodos, antes, durante e depois da mudança. Para garantir a veracidade da comparação, foi considerada a produção de peças cromadas nesses mesmos períodos e como isso influenciou na concentração de cromo. No ano de 2022 o número de peças produzidas foi 1.960,7% maior do que no ano de 2020 para mesma concentração de 0,1 mg/L de ácido crômico na água, enquanto o custo de produção de cada peça, nesse mesmo período, reduziu de R\$0,58 para R\$0,02. Analogamente, houve a redução do consumo de insumos de 97,8% de ácido crômico e 98,24% de tensoativo, indicando uma redução de custo potencial até R\$1.737.317,46 para a produção de peças cromadas, além da estabilidade da concentração de cromo na água.

Palavras-chave: galvanoplastia; cromo; tensão superficial; tensoativo.

ABSTRACT

The galvanizing process is usually used in finishing parts aiming at greater durability through the application of a metallic layer by electrodeposition. Door handles, padlocks and assembly components are galvanized with decorative chrome, which gives the pieces a more elegant finish. Chromium is a compound that when found in its trivalent oxidation form is beneficial to health, however, in hexavalent oxidation, commonly used in electroplating, it is toxic and can cause problems for human health and the environment. The drag from the chromium bath to the rinse water causes an increase in the concentration of hexavalent chromium in the following stages, directly impacting the water treatment plant and the consumption of inputs to replace the amount dragged in a given period. Aiming at lower chromium drag and reduction of the mist formed by the gases in the electrodeposition, a new surfactant was applied, which in smaller quantities has a greater effect. By measuring the surface tension with the addition of the surfactant, it was possible to determine the critical micellar concentration point (CMC) of the surfactant and how the chromium bath behaves with this change. Having verified that the surfactant acts by reducing surface tension without interfering with the concentrations of chromic acid present in the bath, a comparison was made of the concentration of chromium in the rinse water in the periods, before, during and after the change. To ensure the accuracy of the comparison, the production of chrome parts in these same periods was considered and how this influenced the concentration of chromium. In the year 2022, the number of pieces produced was 1.960,7% higher than in the year 2020 for the same concentration of 0,1 mg/L of chromic acid in water, while the cost of producing each piece, in the same period, reduced by R\$0,58 to R\$0,02. Similarly, there was a reduction in input consumption of 97,8% chromic acid and 98,24% surfactant, indicating a potential cost reduction of up to R\$1.737.317,46 for the production of chrome parts, in addition to concentration stability of chromium in water.

Keywords: electroplating; chrome; superficial tension; surfactant.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Galvanoplastia	15
2.1.1	Linha de produção	17
2.1.2	Banho de cromo	26
2.1.2.1	Impacto humano e ambiental	28
2.1.2.2	Efluentes galvânicos contendo cromo	29
2.2	Tensão Superficial.....	31
2.2.1	Tensoativos	33
2.2.1.1	Tensoativos em banho de cromo.....	36
3	OBJETIVO	38
3.1	Objetivo específico.....	38
4	METODOLOGIA	39
4.1	Escolha do molhador	39
4.2	Montagem de banho padrão de cromo.....	40
4.3	Determinação da tensão superficial	41
4.4	Determinação da densidade	44
4.5	Determinação da concentração de cromo na água.....	49
4.6	Consumo de insumos	52
4.7	Produção de peças cromadas.....	53
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
5.1	Tensão superficial	53
5.2	Produção de peças cromadas.....	57
5.3	Concentração de cromo na água efluente	57
5.4	Análise de insumos e econômica	59
6	CONCLUSÃO	62
	REFERÊNCIAS.....	64

1 INTRODUÇÃO

A galvanoplastia é um processo químico e eletrolítico que consiste na eletrodeposição de metais a partir de um meio aquoso com os íons de metais presentes na solução. A galvanização de uma peça confere à superfície da mesma uma camada de metal que ajuda na proteção contra desgastes e corrosão causadas pela rotina de contato, além de evitar a oxidação pelo contato do ar ou de água.

A área de aplicação de galvanização é muito ampla, podendo ser desde acessórios, como bijuterias, maçanetas, torneiras, carros e latas, como cilindros de impressão de embalagens e indústrias metalúrgicas.

O processo de galvanização consiste em basicamente três etapas, as etapas de pré-tratamento que são a preparação da base da peça para receber o banho, o tratamento em si que é a eletrodeposição da camada metálica e o pós tratamento que é a lavagem e secagem final da peça.

Na produção de cadeados e maçanetas, os banhos mais utilizados são os banhos de zinco, cobre ácido, cobre alcalino, níquel e cromo. O banho de zinco é muito utilizado no processo de cromatização das peças, comumente visto em canhões de fechaduras. O banho de cobre alcalino é o banho que dá base para melhorar a aderência dos próximos banhos, como cobre ácido, níquel e cromo. O banho de cobre ácido, além de tornar a peça mais resistente, confere o acabamento rosê em maçanetas e seus componentes, enquanto o níquel aplica uma camada resistente a desgastes e possui um acabamento prateado. O banho de cromo é prevê um acabamento mais elegante das peças, também sendo prateado, porém com fundo mais claro.

Todos os banhos possuem aditivos que tornam o seu processo de eletrodeposição mais eficiente, podendo melhorar na condutividade da solução, no brilho do metal ou até atuar na tensão superficial. Além da qualidade dos banhos, para que ocorra uma boa eletrodeposição são necessários equipamentos específicos, como retificadores para fornecer a condutividade aos banhos, gancheiras para colocar as peças em contato com a energia, barramentos que conduzem energia às gancheiras, agitadores de banho, entre outros.

O emprego de materiais pesados como níquel, cobre, zinco, cádmio, cianeto, cromo, e demais compostos, tornam o processo de galvanoplastia mais complicado devido aos seus resíduos gerados. A água é o insumo mais utilizado na galvanização,

pois é o principal solvente para os banhos metálicos e é base para as etapas de pré-tratamento, pós tratamento e todas as águas de enxágue que sucedem os tanques de eletrodeposição.

A adição de tanques *drag out* após os banhos de níquel e cromo, ajudam no processo de controlar a quantidade de solução arrastada pela peça, já que após a eletrodeposição, as mesmas são imersas nessa recuperação, retirando o excesso de banho que seria lavado na água de enxágue.

Todas essas etapas de água que são retiradas carregam consigo os metais pesados que estão presentes na linha de operação, onde o descarte incorreto, sem tratamento ou com a concentração acima do permitido por lei afeta diretamente no meio ambiente e na saúde humana.

Com o intuito de reduzir a quantidade de banho metálico carregado pelas peças por arraste, é feita a adição de um tensoativo que visa reduzir a tensão superficial do banho, fazendo com que a velocidade com que o banho escorra sobre a superfície da peça aumente, gotejando o máximo possível no período de suspensão antes de ser destinada a próxima etapa (GAMBURG; ZANGARI, 2011).

Além da redução da tensão superficial e do arraste nas peças, quando aplicado o surfactante no banho de cromo, é esperado que ocorra a redução da formação de névoa de ácido crômico que é decorrente das gotículas formadas de gás no processo de eletrodeposição, já que essa névoa é tóxica, podendo causar problemas para aqueles que operam o banho (SILVA, 2010).

Através desses princípios, foi a alteração do tensoativo do banho de cromo, em que o que foi substituído só tem como objetivo suprir a formação da névoa e o novo, a redução da tensão superficial atuando tanto no arraste quanto na formação da névoa.

Assim, este estudo será baseado na determinação da tensão superficial do banho de cromo com a adição de concentrações conhecidas do tensoativo, determinando o ponto de concentração micelar crítica e analisando o impacto que essa alteração causou em questões financeiras e ambientais. O principal objetivo é reduzir a quantidade de ácido crômico consumida no processo de galvanização de maçanetas, cadeados e seus componentes, impactando em uma redução de custo de produção por peças e na concentração de cromo na água destinada ao tratamento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

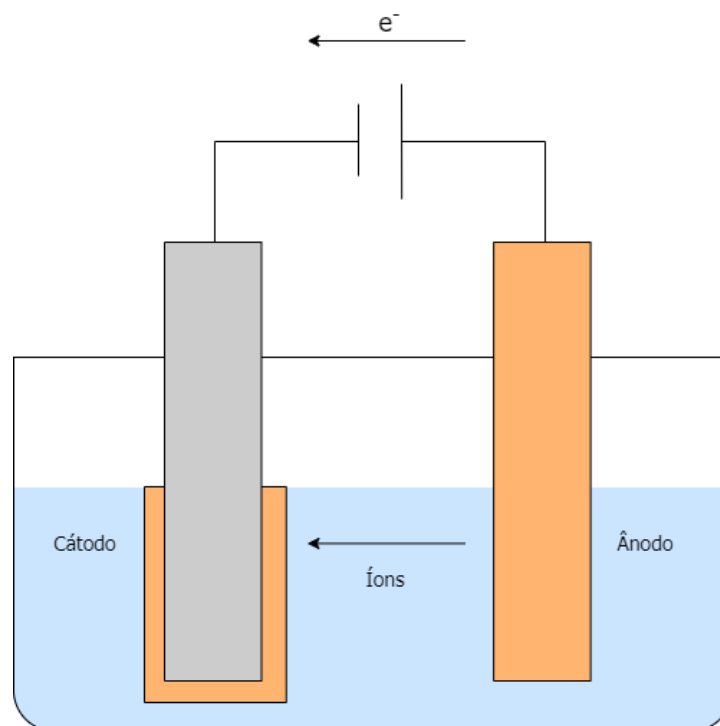
2.1 Galvanoplastia

O processo de galvanoplastia tem como base o princípio da eletrodeposição de metais, onde a partir da eletrólise em meio aquoso deposita uma camada de metal em uma peça, seja ela metálica ou não, visando uma camada protetora contra corrosão ou desgaste por manipulação rotineira.

A eletrodeposição ocorre através da energia elétrica convertida em energia química, realizando a redução de íons metálicos de um eletrólito. Agindo como condutor iônico, o eletrólito faz com que as espécies químicas que contêm o metal de interesse se dissolvam em um solvente, no caso a água, formando uma solução do sal do metal (GAMBURG; ZANGARI, 2011).

Portanto, o processo de eletrodeposição consiste na imersão da peça que deseja ser revestida em um tanque contendo o eletrólito e um contra eletrodo, interligados por uma fonte de alimentação de energia externa para fornecer corrente para que ocorra a redução dos íons metálicos (GAMBURG; ZANGARI, 2011), como representado na Figura 1.

Figura 1: Sistema eletrolítico.



Fonte: Autoria própria (2022)

Para que ocorra a troca iônica dos metais do banho metálico, são necessários eletrodos, que são condutores carregados positivamente ou negativamente, e de uma fonte de tensão constante, advinda de um retificador.

O ânodo é um eletrodo no qual os íons negativos são descarregados, ou são formados íons positivos, ou onde ocorre as reações oxidantes (BRENNER, 1963), podendo ser ativo, onde o processo de oxidação ocorre pela dissolução do metal, formando uma espécie iônica dissolvida na solução, ou inerte, onde o ânodo não participa da reação, porém garante a troca eletrônica na superfície (SINISI, 2016).

O cátodo é um eletrodo no qual os íons positivos são descarregados, ou ocorre a formação de íons negativos, ou onde ocorrem as reações redutoras (BRENNER, 1963). Normalmente, o cátodo é o item a ser galvanizado e que serão depositados os íons metálicos que estão dissolvidos na solução eletrolítica (SINISI, 2016).

O meio em que ocorre essa troca iônica é chamado de solução eletrolítica ou banho metálico. O sistema eletrolítico consiste em solvente capaz de ionizar os sais que possuem em sua composição os metais desejados que serão depositados, onde na maioria dos casos é utilizada a água para realizar a dissolução. A partir disso, ocorre a transmissão de corrente no sistema eletrônico por condução iônica através dessas espécies iônicas dissolvidas no banho, permitindo que os metais dissolvidos sejam depositados e reduzidos no cátodo (SINISI, 2016).

Visando aprimorar o processo de eletrodeposição, são adicionados nos banhos galvânicos aditivos orgânicos ou inorgânicos que podem ser niveladores, abrillantadores ou atuarem na condutividade. Os niveladores “preenchem” possíveis arranhões ou buracos que a peça possui, além de suavizar a superfície; os abrillantadores permitem o depósito mais brilhante dos metais; enquanto os aditivos que atuam na condutividade fazem com que a tensão interna dos depósitos diminua e a eficiência da corrente aumente (GAMBURG; ZANGARI, 2011).

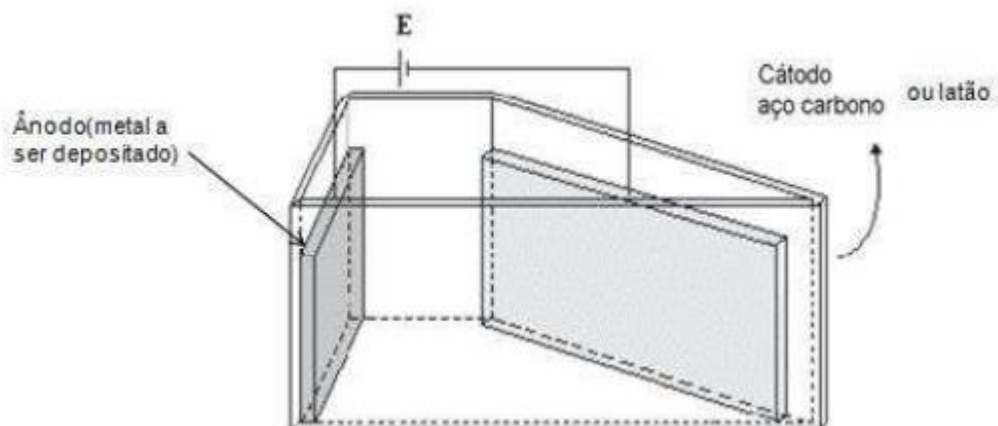
Outro aditivo muito importante é o surfactante, que é adicionado à solução para diminuir a tensão superficial da solução, facilitando o desprendimento das bolhas de hidrogênio da superfície, que podem causar defeitos pontuais, como os poros (GAMBURG; ZANGARI, 2011).

No processo produtivo da galvanoplastia, para que seja feito o banho de boa qualidade, são necessárias algumas etapas que antecedem a eletrodeposição para que ocorra a preparação das peças, onde a superfície é limpa de maneira minuciosa

para retirar contaminantes e ativada para otimizar o recebimento do banho metálico. Em sequência, as peças passam para a aplicação da camada de metal, onde uma das etapas mais importantes é o cobreamento da peça, que ocorre através do depósito de cobre na superfície, fornecendo uma nivelção na base para próximos processos de eletrodeposição, podendo ser de níquel, prata, cromo, ouro, paládio, e outros que são indispensáveis no processo de galvanização (VIEIRA, 2022).

Para que seja possível observar como a eletrodeposição irá se comportar em escala de operação é feita a célula de Hull, indicada na Figura 2, que é a reprodução da eletrodeposição na peça em escala laboratorial, feita a partir de um painel de latão, com a amostra do banho e um retificador simulando as condições de densidade de corrente na produção.

Figura 2: Esquematização da célula de Hull.



Fonte: SCHMITZ et al. (2022)

2.1.1 Linha de produção

Na indústria galvânica são necessários alguns equipamentos para que ocorra o processo, sendo eles tanques, fonte de energia, barramentos, gancheras, cestos de ânodos, resistência, agitação e filtração. Os tanques podem ser feitos de diversos materiais, desde que sejam resistentes às soluções químicas, aos banhos e à mudanças de temperatura. Para que ocorra a distribuição da corrente elétrica para que ocorra a eletrólise é necessário um equipamento que seja a fonte de energia, podendo ser um retificador de corrente contínua. Já os barramentos, representados na Figura 3, são barras que são ligadas no polo negativo do retificador, em que as

peças revestidas ficam suspensas no banho, enquanto os cestos que contém os ânodos estão ligados ao polo positivo do retificador.

Figura 3: Barramento de linha automática de galvanoplastia.



Fonte: Autoria própria (2022)

As gancheiras, por sua vez, são os suportes em que as peças serão encaixadas, podendo variar o modelo de acordo com a peça a ser galvanizada, como apresentada na Figura 4.

Figura 4: Gancheira de linha automática de galvanoplastia.

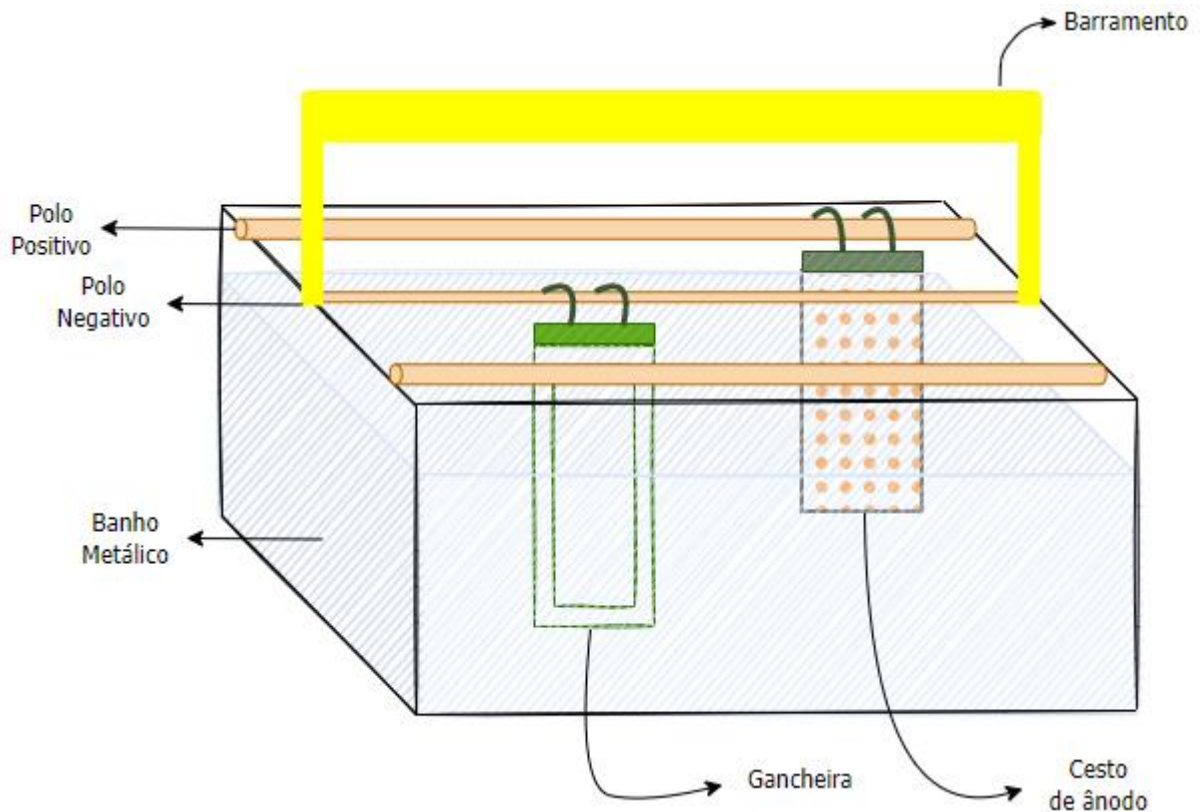


Fonte: Autoria própria (2022)

Por fim, para que os parâmetros dos banhos sejam ajustados para garantir o controle de qualidade dos banhos, são necessárias resistências para que aqueçam o banho até a temperatura ideal de seu funcionamento, assim como é necessário a agitação dos banhos para garantir que a homogeneização da solução seja garantida durante todo o processo, atingindo todas as cavidades da peça (VIEIRA, 2022).

A Figura 5 representa de maneira esquemática o tanque eletrolítico que ocorre a galvanização e os demais processos.

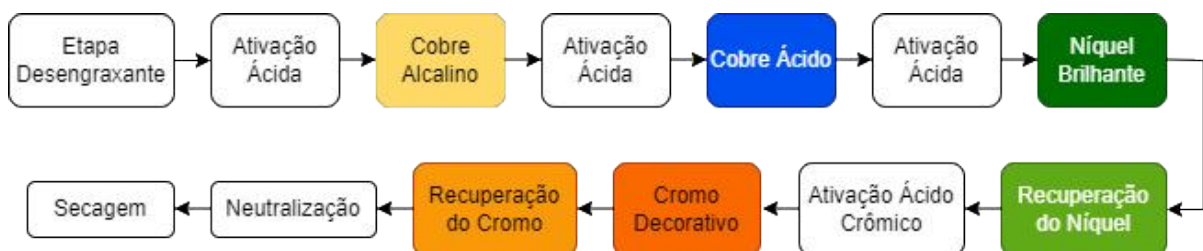
Figura 5: Esquemática de um tanque eletrolítico.



Fonte: Autoria própria (2022)

A linha de produção de galvanização de maçanetas, hastes de cadeado e componentes de fechadura pode ser representada através do fluxograma resumido representado na Figura 6.

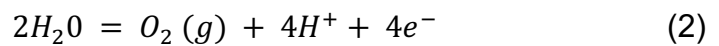
Figura 6: Fluxograma resumido da linha de produção.



Fonte: Autoria própria (2022)

A etapa de desengraxante é composta por três tipos de desengraxantes, com a função de limpar as peças, removendo óleos, massa de polimento e possíveis gorduras. É composta pelo desengraxante químico, desengraxante ultrassom e desengraxante eletrolítico. O desengraxante químico é feito por imersão do

barramento no tanque com agitação da solução para promover o contato do desengraxante com a peça, enquanto o ultrassom possui ondas de alta frequência que geram bolhas na solução, atingindo a superfície do objeto e removendo a sujeira, realizando o desengraxe e o eletrolítico é composto pelo eletrolítico catódico e anódico. O desengraxante eletrolítico age com a presença de corrente elétrica, podendo ser o desengraxante eletrolítico catódico ocorre a reação de redução do íon de hidrogênio formando gás hidrogênio, como representado na Equação 1, enquanto no desengraxante eletrolítico anódico, que ocorre a reação de oxidação da água, formando gás oxigênio e cátion hidrogênio, como representado na Equação 2 (PUGAS, 2007).



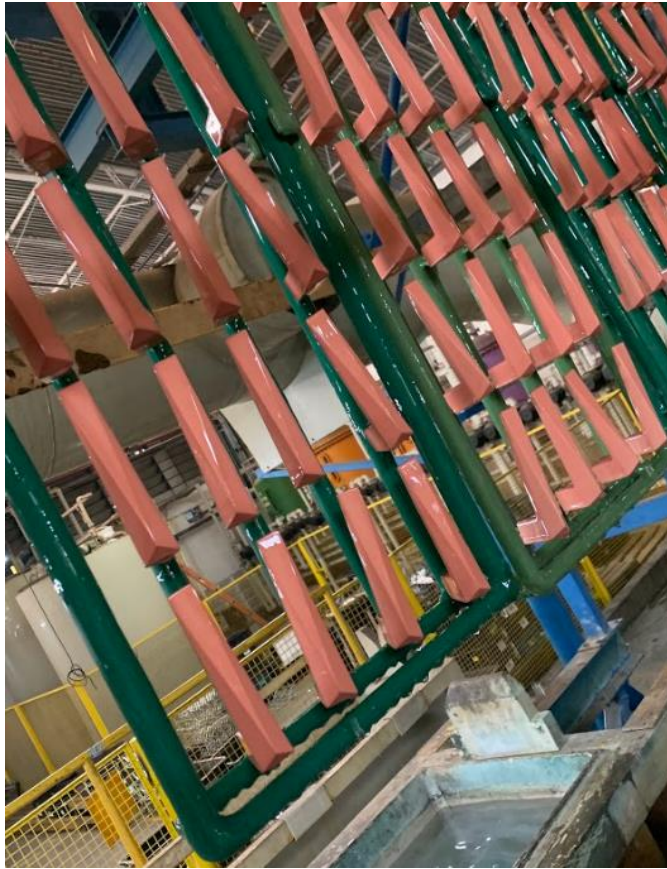
O que difere outro no processo é que a quantidade de hidrogênio desprendido é duas vezes maior que a quantidade de oxigênio, sendo que o desengraxante eletrolítico catódico antecede o processo do desengraxante eletrolítico anódico (SILVA, 2010).

A ativação ácida é composta por uma solução ácida, normalmente de ácido sulfúrico, para que ative a peça para poder receber o banho metálico. Essa ativação prepara a superfície neutralizando a peça que passou pelo desengraxe, que por sua vez é alcalino, fazendo com que a peça esteja apropriada para a eletrodeposição da camada de metal e esse processo seja maximizado.

A verificação da eficácia de desengraxe e ativação pode ser vista através da superfície do objeto, em que quando a peça for molhada, a água forme apenas uma camada fina e homogênea na superfície, semelhante a uma película (SINISI, 2016).

Em seguida a peça passa para o primeiro procedimento de galvanização. O cobre alcalino é um banho metálico composto por cianeto de cobre, cianeto de sódio e hidróxido de sódio, operando a uma temperatura de 40 a 50°C, com a eletrodeposição do cobre metal na peça, realizando um melhor nivelamento da peça e dando aderência às próximas deposições de camadas. Após passar a peça metálica nesse banho, ela apresenta uma coloração rosê fosca, como representada na Figura 7.

Figura 7: Peças com eletrodeposição do cobre alcalino.



Fonte: Aatoria própria (2022)

O cobre ácido é um banho metálico composto por sulfato de cobre, ácido sulfúrico e íon cloreto, operando à temperatura ambiente, com eletrodeposição do cobre metal na peça. Esse banho nivela a peça de maneira que não há necessidade de lustramento e polimento da peça para as próximas etapas, com baixa porosidade na superfície e maior ductilidade (VIEIRA, 2022). A peça, após passar nesse banho metálico, apresenta uma coloração rosê brilhante, como representada na Figura 8.

Figura 8: Peças com eletrodeposição do cobre ácido.



Fonte: Aatoria própria (2022)

O níquel brilhante é um banho metálico composto por sulfato de níquel, cloreto de níquel e ácido bórico, operando à temperatura de 58 a 62°C, com eletrodeposição do níquel na peça, apresentando coloração prateada após a eletrodeposição, como representada na Figura 9.

Figura 9: Peças com eletrodeposição do níquel brilhante.



Fonte: Autoria própria (2022)

O tanque de recuperação de níquel é um tanque composto de banho de níquel em menor concentração, sem que ocorra eletrodeposição de metal na peça, apenas a imersão do barramento, com função de retirar o banho de níquel brilhante que veio por arraste dos tanques de níquel anteriores.

A ativação de ácido crômico é composta por uma solução de ácido crômico em água, com concentração de 0,4 g/L de ácido crômico, com a finalidade de ativar a peça para receber o banho de cromo.

O banho de cromo é composto pelo Composto Macchrome[®], que possui o ácido crômico e o catalisador, e ácido sulfúrico, operando à temperatura de 40 a 50°C, com eletrodeposição de cromo na peça. O acabamento superficial da peça após passar no banho de cromo apresenta uma coloração prateada, como apresentada na Figura 10.

Figura 10: Peças com eletrodeposição do cromo.



Fonte: Autoria própria (2022)

O tanque de recuperação do cromo possui o mesmo objetivo que o tanque de recuperação do níquel, imergir o barramento com as peças para recuperar parte do banho de cromo que veio por arraste do processo anterior, sem que haja eletrodeposição de cromo na peça.

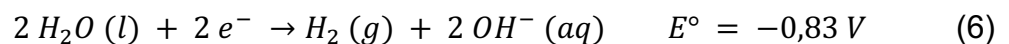
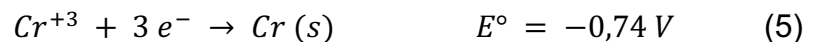
A etapa de neutralização é feita com o objetivo de realizar a redução do cromo hexavalente da solução que ainda está na peça, de maneira que se reduza a cromo trivalente. Em seguida, a peça passa por lavagem em água quente e é enviada para a secadora por ar quente para retirar a maior parte de água que ficou retida na peça. Outros processos de lavagens estão presentes entre as etapas dos banhos, tanto antecedentes quanto posteriores aos desengraxes, ativações e banhos metálicos.

2.1.2 Banho de cromo

O banho de cromo é comumente utilizado na indústria nas formas de deposição de cromo duro e de cromo decorativo, diferenciando pelas propriedades e princípios. O cromo duro é aplicado diretamente no material base, sendo um depósito mais espesso e em temperaturas e densidades mais elevadas, seu acabamento permite maior resistência à corrosão e abrasão. O cromo decorativo é depositado sobre o níquel, tendo uma deposição menos espessa e apenas uma melhora na resistência à abrasão, sendo uma camada protetora para que não ocorra oxidação do níquel (BOFF, 2020).

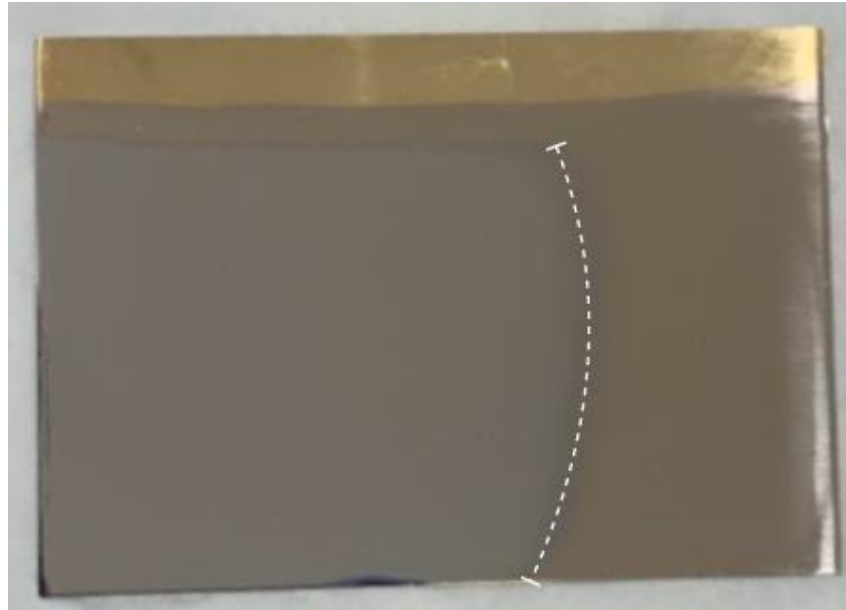
A constituição do banho de cromo é de óxido de cromo e ácido sulfúrico, de maneira que resulte em ácido crômico, em que o sulfato é de 1,6 a 2,5% em relação ao óxido de cromo. Para a utilização como cromo decorativo, a concentração ideal é de 300 g/L de ácido crômico, operando a uma faixa mais restrita de temperatura de 40 a 46°C e com a corrente de densidade de 10 a 25 A/dm² (MACDERMID ETHONE, 2020). A camada de cromo depositada varia de 0,2 a 0,5 µm de espessura, dependendo do tempo de cromação, que normalmente é de 3 minutos, e da densidade da corrente.

No processo do banho de cromo são realizadas as reações descritas pelas Equações 3, 4, 5 e 6, em que a Equação 3 representa a reação que ocorre no ânodo de chumbo e as reações 4, 5 e 6 ocorrem no cátodo.



A eletrodeposição do cromo em cima do níquel dá à peça um aspecto prateado com um fundo mais azulado do que quando comparado com o prateado do níquel, sendo possível visualizar através da célula de Hull, representada na Figura 11. O lado esquerdo da linha tracejada representa a camada de cromo, enquanto o lado direito representa a camada de níquel.

Figura 11: Peças com eletrodeposição do cromo.



Fonte: Autoria própria (2022)

Durante o processo de cromação, aproximadamente 85% da corrente catódica é responsável pela produção do gás hidrogênio, que juntamente com o oxigênio que o ânodo produz, arrasta para o ambiente uma névoa de ácido crômico. A outra porcentagem da corrente, 15%, é responsável pela redução do cromo hexavalente em cromo metálico, como representado nas Equações 4 e 5, fazendo a eletrodeposição na peça (SILVA, 2010).

O processo de redução do cromo hexavalente em cromo metal não é 100% eficiente, sendo que aproximadamente 3% desse cromo fica mantido na forma de cromo trivalente, em que a alta concentração nessa forma pode prejudicar a eletrodeposição do cromo metal na peça. Para que a concentração de cromo trivalente seja menos predominante que o hexavalente é necessário controlar o pH do banho, já que em meios ácidos, com pH abaixo de 7,5, a forma trivalente predomina, enquanto em banhos com meios básicos, com pH acima de 8,0, a forma hexavalente é predominante (MORAES, NETO, GLADEK, 2012).

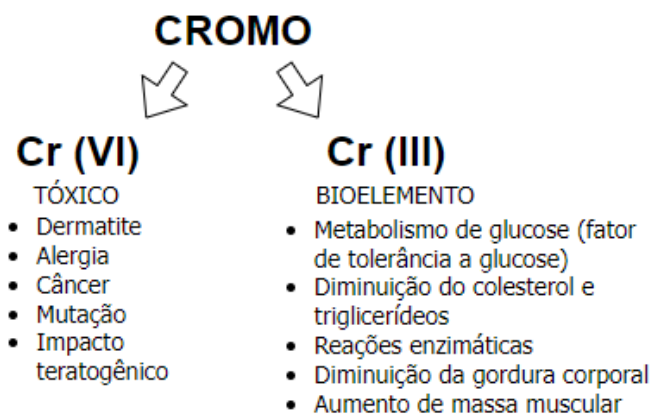
Fatores importantes que relacionam o cromo com danos à saúde são a solubilidade do composto do cromo e a sua valência, e a maneira em que ele se encontra disperso no ar do ambiente de trabalho, sendo em forma de névoa, vapores ou poeiras (SILVA, 2010). Além disso, o estado de oxidação do cromo se relaciona

com a contaminação ambiental, onde o cromo trivalente é natural do meio ambiente e o cromo hexavalente e de outras formas oxidadas são produzidas por processos industriais, principalmente em indústrias metalúrgicas (NUNES, OLIVEIRA, BENINI, 2012).

2.1.2.1 Impacto humano e ambiental

Os estados de oxidação do cromo variam de Cr^{-2} a Cr^{+6} , sendo que os mais comuns são os Cr^{+3} , trivalente, e Cr^{+6} , hexavalente, devido às suas estabilidades. Enquanto a forma trivalente é essencial para o metabolismo humano, onde pequenas quantidades são recomendadas para o organismo, a forma hexavalente é tóxica, sendo considerada cancerígena e mutagênica (HELENE, 2016). A Figura 12 traz consigo os efeitos causados pelo cromo trivalente e hexavalente para os humanos.

Figura 12: Efeitos positivos e negativos do cromo para o ser humano.



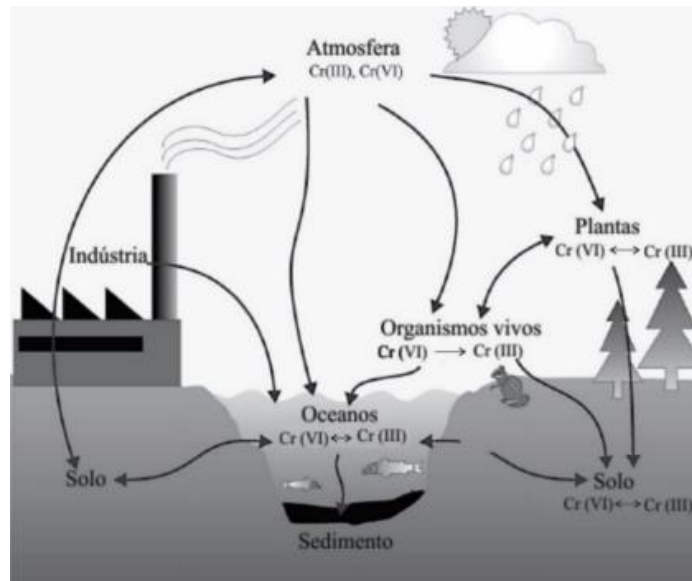
Fonte: Adaptado de BIELICKA *et al.* (2005)

A principal via de contaminação do cromo hexavalente no corpo humano é por absorção respiratória, podendo ser também por contato com a pele ou ingestão. A exposição excessiva ao cromo hexavalente pode causar perfurações no septo nasal e ulcerações, além de estar relacionado com o câncer pulmonar, trato respiratório e gastrointestinal (GALVÃO, COREY, 1987).

O cromo hexavalente que é encontrado do meio ambiente é advindo da atividade humana, onde as fontes que liberam esse cromo no meio ambiente são indústrias de ligas metálicas, industriais galvanoplastia, minas, fertilizantes, soldagem,

fábricas de cimentos, entre outras (NUNES, OLIVEIRA, BENINI, 2012). A contaminação ocorre através da difusão pelo solo, água e ar, onde a forma em que é encontrado depende das condições do meio, em que o cromo hexavalente predomina onde as condições de oxidação são elevadas, enquanto o cromo trivalente predomina em ambientes com condições redutoras, como representado na Figura 13.

Figura 13: Ciclo do cromo no ambiente e suas especiações.



Fonte: HELENE (2016) apud BIELICKA, *et al.* (2005)

2.1.2.2 Efluentes galvânicos contendo cromo

No Brasil o controle de efluentes lançados pela fonte poluidora é feito a partir da Resolução n° 430 do CONAMA, onde há condições de pH, temperatura, entre outros parâmetros, que devem ser respeitadas, assim como os valores máximos de contaminantes que podem haver nesse efluente, sendo que para o cromo trivalente é de no máximo 1,0 mg/L e para o cromo hexavalente é de 0,1 mg/L (CONAMA, 2011).

De maneira geral, o processo galvânico é dividido em três etapas principais, sendo elas o pré-tratamento, a eletrodeposição e o pós tratamento. O pré tratamento conta com as etapas de desengraxe e ativação, enquanto o pós tratamento conta com os enxágues após a eletrodeposição. Nesta última etapa as peças são lavadas com água após cada banho, gerando efluentes com características diversas, que após certo período de tempo devem ser trocadas, tratadas e descartadas.

No processo de níquel e de cromo é muito comum a presença de *drag out*, que é um tanque de enxágue posicionado após o tanque de eletrodeposição, retirando o excesso de banho que veio por arraste pela peça. Esse tanque possui uma concentração dos sais metálicos muito próxima ao tanque original de níquel e cromo que é utilizado para a eletrodeposição, porém, sua função é única e exclusivamente de retirada de excesso por imersão, sem que haja deposição.

A presença de um tanque *drag out* faz com que ocorra a diminuição da concentração de metais destes banhos nas águas de enxágue que são trocadas diariamente, diminuindo a quantidade de efluentes contaminados destinados ao tratamento. A solução contida neste *drag out* é utilizada na reposição de líquido e sais dos banhos originais de maneira que diminua o consumo de sais puros para reforços dos banhos (PONTES, 2013).

No processo de cromagem, após o tanque de recuperação, tem-se o tanque de enxágue. A troca de água do tanque de enxágue ocorre em curtos períodos de tempo para que seja eficaz a operação, em que esse efluente gerado é composto por cromo em estado de oxidação seis devido ao ácido crômico (FAVERO, 2018).

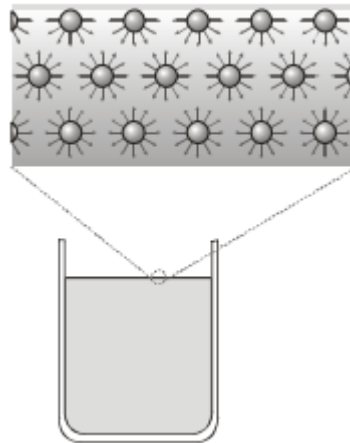
O tratamento de efluentes contendo cromo é feito a partir da redução do cromo, onde todo o cromo hexavalente que possui na solução é reduzido a cromo trivalente a partir da utilização de um redutor adequado (SANTOS, 2000). Os principais redutores são o bissulfito de sódio, metabissulfito de sódio, sulfato ferroso e o dióxido de enxofre, onde o mais utilizado dentre eles é o metabissulfito de sódio, devido ao seu rendimento elevado e por ter baixo custo (PIMENTEL, 2003).

Com o intuito de reduzir a quantidade de cromo arrastada pela peça do banho de cromo e de seu *drag out* para a etapa de enxágue e, conseqüentemente, para o efluente, é feita a adição de agentes tensoativos para a redução da tensão superficial da solução, com o objetivo de que as peças apresentem menor adesão do líquido em sua superfície, de maneira que o líquido se arraste e se espalhe como um filme contínuo escorrendo sobre a peça (PACHECO, 2002).

2.2 Tensão Superficial

O fenômeno de tensão superficial ocorre através das forças de atração entre as moléculas, que estão situadas no interior do líquido são atraídas pelas moléculas vizinhas por todas as direções, fazendo com que a força resultante que atua sobre cada molécula seja parcialmente nula. Já as moléculas da superfície do líquido, não são atraídas por todos os lados, já que não há força exercida pelo ar, sendo somente as atrações laterais e inferiores, como mostra a Figura 14.

Figura 14: Representação das moléculas no interior de um líquido.



Fonte: UFMG (2012)

A força exercida pela molécula da superfície para o lado e para baixo faz com que se crie uma tensão superficial, devido a uma concentração espontânea na superfície, que se comporta como uma película elástica (FEUP, 2014). Esse fenômeno pode ocorrer quando pequenos objetos pousam e flutuam sobre a superfície da água sem que se molhem, por exemplo, um inseto flutuando na água, na formação de uma gota em alguma superfície, como mostrado na Figura 15.

Figura 15: Representação de uma gota d'água na superfície de uma folha.

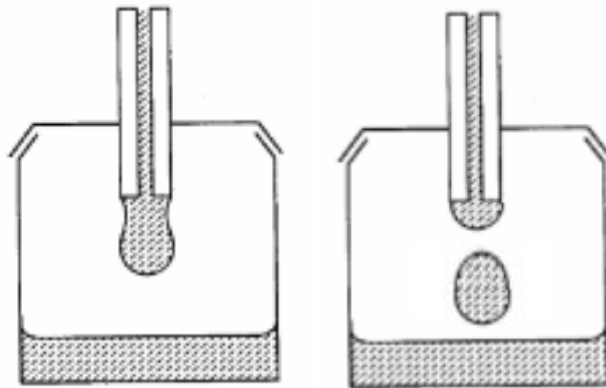


Fonte: HORMANN (2013)

Há diversos métodos para a medida de tensão superficial, dentre eles estão o método capilar, o método de placas de Wilhelmy, método do anel, método baseado no volume e peso da gota, método da gota pendente e o método do jato oscilante (SHAWN, 1975).

Um dos métodos mais utilizados para a determinação da tensão superficial é o método capilar, que consiste em usar tubos capilares de vidro com um diâmetro interno pré-definido, que quando em contato com o líquido, através da atração ou repulsão, o mesmo sobe ou desce de acordo com a força entre o líquido e a parede do capilar (PARANHO, VECHIA, BELTRAME, 2008). Outro método muito utilizado é o do volume e peso da gota, representado pela Figura 19, onde a gota do líquido se desprende na extremidade inferior de um tubo estreito, que é mantido na vertical e em seguida as gotas ou são pesadas ou é medido o volume.

Figura 19: Desprendimento de uma gota na extremidade de um tubo.



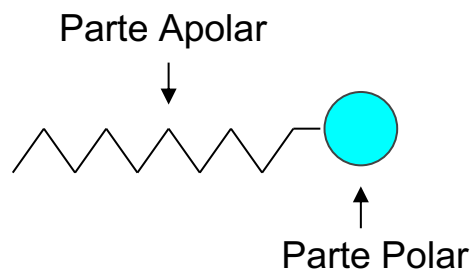
Fonte: Adaptado de OROPEZA (2011)

A tensão superficial varia de acordo com a temperatura, em que ocorre a sua diminuição com o aumento da temperatura, de maneira que a tensão se torne muito pequena quando próxima da temperatura crítica, onde não há força intermolecular coesiva (SHAW, 1975). Outro fator que altera a tensão superficial é a adição de um tensoativo ou surfactante, que interage com as moléculas reduzindo a tensão superficial.

2.2.1 Tensoativos

Os tensoativos, que podem ser chamados de surfactantes, são compostos anfifílicos, que possuem estruturas químicas apolar ou hidrofóbica, representado pelo corpo do tensoativo, e a parte polar, representada pela ponta da molécula. A esquematização de um tensoativo pode ser representada pela Figura 20.

Figura 20: Representação esquemática da molécula de um tensoativo.

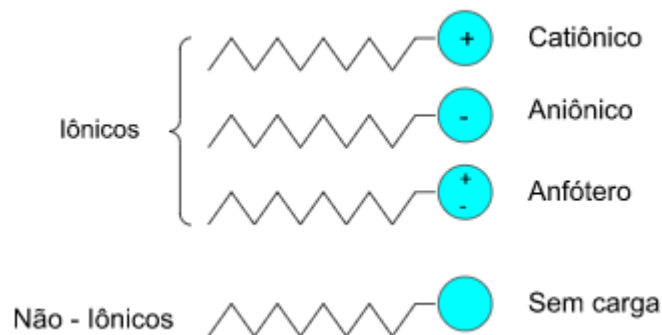


Fonte: Autoria Própria (2022)

Os tensoativos têm como propriedades a formação de bolhas e espumas em líquidos, na superfície, e de se adsorver nas interfaces ou superfícies de líquidos-gás, sólidos-líquidos e líquidos-líquidos, de maneira que promova a redução da tensão superficial e interfacial. A interface é referente ao limite de duas fases imiscíveis, enquanto a superfície é referente a interface em que uma das fases pode ser um gás (SILVA, 2014).

Referente à classificação, um tensoativo pode ser definido de acordo com a região polar, podendo haver tensoativos iônicos, como os catiônicos, aniônicos ou anfóteros, e os tensoativos não iônicos, que não possuem carga. A representação da classificação dos tensoativos quanto ao seu tipo é apresentada na Figura 21.

Figura 21: Representação esquemática dos tipos de tensoativos.

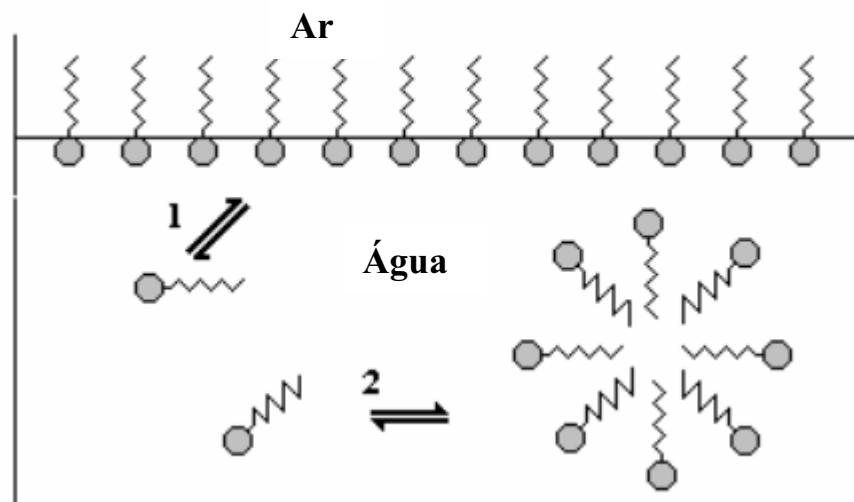


Fonte: Aatoria Própria (2022)

Em solução aquosa, os tensoativos catiônicos possuem, em sua superfície ativa, grupos ionizáveis carregados positivamente, sendo utilizados em tratamento de água, cosméticos e outros. Os tensoativos aniônicos são carregados negativamente em sua superfície ativa, sendo mais comuns os sabões e compostos sulfonados. Os tensoativos anfóteros possuem radicais ácidos e radicais básicos em sua estrutura, podendo admitir características aniônicas ou catiônicas, dependendo das condições de pH da solução, como por exemplo, tem-se os fosfolipídios. Por fim, os tensoativos não iônicos não apresentam ionização em solução aquosa, sendo assim, sua solubilidade deve-se a presença de grupos funcionais que compõem sua estrutura, com forte afinidade com a água, tendo como exemplo o propileno glicol etoxilado (SANTANNA, 2003).

Quando em soluções, os tensoativos ocupam preferencialmente a superfície do líquido, isso devido à presença do grupo lipofílico, que promove a solubilidade de lipídios, fazendo com que diminua a força de coesão entre as moléculas da solução, como consequência, diminui a tensão superficial. Preferencialmente, a orientação das moléculas de tensoativos direcionam a cabeça polar para a solução, enquanto a cauda apolar é orientada para a superfície. Dado um momento em que toda a superfície está completa por tensoativos, ocorre a saturação da interface e quando adicionado mais moléculas de tensoativos, é formado espontaneamente as micelas (BEHRING; LUCAS; BARCELLOS; 2004). A Figura 22 representa a esquematização das moléculas de tensoativo em uma solução, onde 1 é a formação do filme interfacial e 2 é a formação de micela.

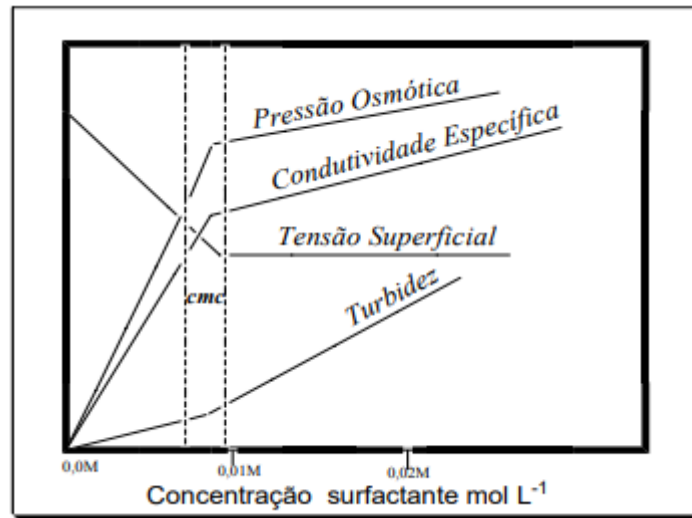
Figura 22: Representação esquemática do comportamento do tensoativo em solução.



Fonte: SANTANNA (2003)

As micelas são agregados moleculares, de tensoativo, que possuem tamanho coloidal. A micelização ocorre em uma dada temperatura e concentração que é chamada de concentração micelar crítica (CMC), sendo definida como a concentração máxima em que o monômero é solúvel, e a partir dessa concentração, assume uma conformação termodinamicamente estável. A determinação do CMC pode ser feita através de propriedades físicas como viscosidade, tensão superficial, condutividade elétrica, turbidez e pressão osmótica, como representada na Figura 23. (DAL-BÓ, 2007).

Figura 23: Técnicas de determinação do CMC.



Fonte: DAL-BÓ (2007)

A utilização de técnicas de tensão superficial e condutividade específica são vantajosas por serem técnicas clássicas, que são utilizadas em larga escala para a determinação da CMC.

2.2.1.1 Tensoativos em banho de cromo

A utilização de tensoativos em banhos de cromo é feita especialmente para suprir a névoa formada durante a eletrodeposição devido à gaseificação no ânodo e cátodo.

A adição de um surfactante adequado reduz o diâmetro das bolhas de gases ascendentes, diminuindo a tensão superficial. Com essa redução do diâmetro, as gotículas da gaseificação não estouram na superfície do banho de cromo, conseqüentemente, não causam a névoa indesejada (MACDERMID ENTHONE, 2022). A Figura 24 ilustra como seria a formação dessa névoa durante um processo de eletrodeposição.

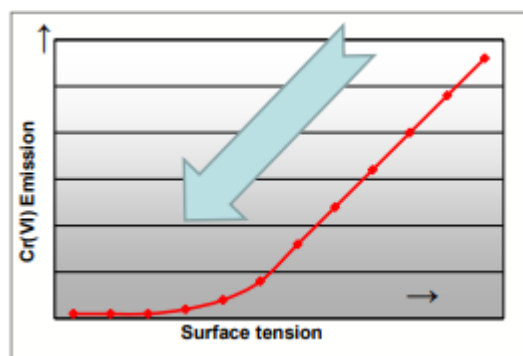
Figura 24: Formação de névoa na eletrodeposição.



Fonte: MACDERMID ENTHONE (2022)

A névoa está relacionada com a emissão de cromo hexavalente para o ar e, conseqüentemente, a contaminação prejudicial para o meio ambiente e o ser humano. Com a adição do surfactante, a tensão superficial reduz, as bolhas de gás reduzem e, como resultado, reduz a quantidade de cromo hexavalente emitido, como mostra a Figura 25.

Figura 25: Comportamento da emissão de cromo hexavalente em relação a tensão superficial.



Fonte: MACDERMID ENTHONE (2022)

A partir da Figura 26 é possível observar a diferença de uma solução com tensoativo ou não, em que a imagem à esquerda representa a solução sem tensoativo e a direita a solução com tensoativo, diferindo principalmente na formação de espumas.

Figura 26: Diferenciação do uso de tensoativos em banho de cromo.



Fonte: MACDERMID ENTHONE (2022)

Por fim, além da utilização do surfactante para a redução da formação da névoa e redução da tensão superficial, esse aditivo impacta o arraste da solução pela peça, reduzindo esse fator e, conseqüentemente, reduzindo a manutenção do banho com a adição de sais para manter a concentração ideal.

3 OBJETIVO

O alvo principal deste estudo é reduzir o consumo de ácido crômico no processo de eletrodeposição do cromo em peças metálicas na galvanoplastia, com a alteração do molhador supressor de névoa para um tensoativo que reduz a tensão superficial

3.1 Objetivo específico

- Alteração do supressor de névoa para um tensoativo aniônico fluorado;
- Análise da redução da tensão superficial do banho de cromo de acordo com a adição de tensoativo em escala laboratorial;
- Análise da influência do arraste do banho de cromo na concentração de cromo hexavalente na água de enxágue;
- Análise da viabilidade econômica e do consumo dos insumos para preparação do banho de cromo relacionando com a quantidade de peças cromadas produzidas.

4 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para determinar a tensão superficial do banho de cromo foi através do uso de estalagmômetro e a determinação de sua densidade através do baumé. Para a análise da concentração de cromo na água foi utilizado o espectrofotômetro, enquanto que para a análise de dados de produção e econômico foram feitos levantamentos no sistema interno da empresa de consumo de insumos e de quantidade de peças cromadas produzidas.

4.1 Escolha do molhador

A troca do molhador ocorreu em outubro de 2021, onde foi acompanhada no período de escolha do tensoativo e início da aplicação na linha de produção. A escolha foi feita juntamente com o fornecedor dos demais compostos utilizados no processo.

O molhador Mac Névoa® tem como base na sua composição os PFOS (sulfonato de perfluorooctano), que são químicos sintéticos estáveis formados por oito cadeias de carbono, causando alta repelência entre a água e o óleo, sendo utilizados em proteção de superfície, como tensoativos, emulsificantes, umectantes, entre outros (EUROLAB, 2019). Esses químicos são nocivos a nível de reprodução, podendo ser acumulado no organismo de animais e seres humanos, assim como na natureza.

O PFOS não é mais produzido em diversos países, tendo seu uso eliminado desde 2015 nos Estados Unidos da América. A contaminação por esse composto tóxico tem sido controlada desde a Convenção de Estocolmo sobre poluentes orgânicos persistentes de 2001 (LERNER, 2019).

Sendo assim, o fornecedor de produtos químicos da empresa sugeriu a alteração para os novos surfactantes desenvolvidos pela empresa, que não possuem a presença de PFOS. Tinha como opções dois tensoativos, em que um reduzia parte da espuma, porém em concentrações muito altas e temperaturas mais baixas a produção de espuma aumentava, enquanto o outro tensoativo operava sem limitações nas faixas de operação do banho de cromo sem a formação excessiva de espuma.

Dessa maneira, foi escolhido o novo tensoativo Macuplex STR NPFX®, que é um composto surfactante aniônico fluorado isento de PFOS, reduzindo a tensão superficial e agindo como supressor de névoa, com alto desempenho técnico (MACDERMID ENTHONE, 2020).

4.2 Montagem de banho padrão de cromo

O banho padrão de cromo foi montado baseando-se no boletim técnico do composto Macchrome® (MACDERMID ENTHONE, 2020). As condições operacionais para o processo do composto estão representadas na Tabela 1

Tabela 1 - Condições operacionais do composto Macchrome ®.

Parâmetros	Faixa
Composto Macchrome	180 - 250 g/L
Sulfato	0,6 - 1,0 g/L
Relação CrO ₃ /SO ₄	250:1
Temperatura	40 - 46°C
Densidade de Corrente	10 - 25 A/dm ²

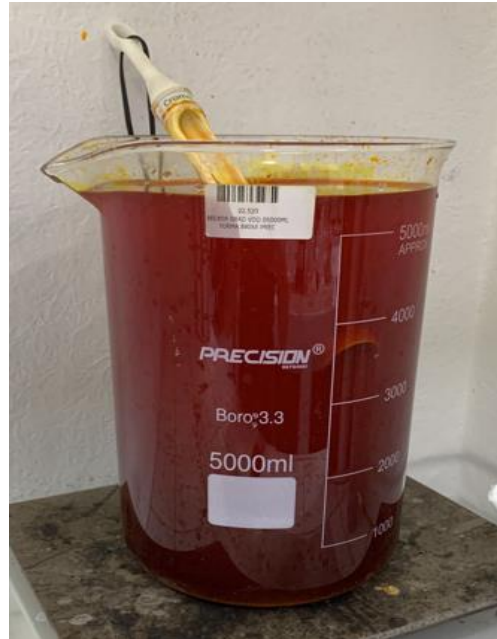
Fonte: MacDermid Enthone (2020)

Para que o experimento se assemelhe com o real banho de cromo utilizado na linha de produção, a concentração de composto Macchrome® utilizada foi de 300 g/L, com a finalidade de peças metálicas com o acabamento mais elegante.

Para a montagem de 5 litros de banho padrão, foram utilizados 1500 g de composto Macchrome®, com o objetivo de obter uma solução com concentração de 300 g/L do composto. Seguindo os parâmetros do boletim técnico, a relação de trióxido de cromo, CrO₃, com o sulfato, SO₄, é de 250:1, portanto, para cada 250 g/L de composto Macchrome®, foi necessária a adição de 1 g/L de ácido sulfúrico 98% P.A. Logo, para 300 g/L de composto Macchrome® utilizados, foram necessários 1,2 g/L de ácido sulfúrico 98% P.A.

Após a pesagem de 1500 g de composto Macchrome® e de 6,048 g de ácido sulfúrico 98%, foi feita a montagem do banho seguindo o procedimento informado no boletim técnico, onde foi feita a adição de $\frac{2}{3}$ do volume final de água companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), aproximadamente 3,5 L, e pré aquecida a 40°C. Em seguida foi feita a adição de 1500 g do composto Macchrome® e agitado até total diluição do produto, seguida da adição de 6,048 g ácido sulfúrico e adicionado o restante da água completando 5 litros de solução. O banho padrão de cromo está representado pela Figura 27.

Figura 27: Banho padrão de cromo.

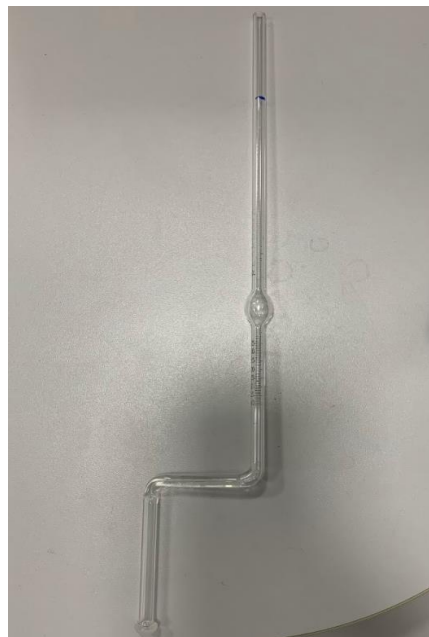


Fonte: Autoria própria (2022)

4.3 Determinação da tensão superficial

Para realizar a medida de cada amostra foi utilizado o equipamento estalagmômetro, representado na Figura 28.

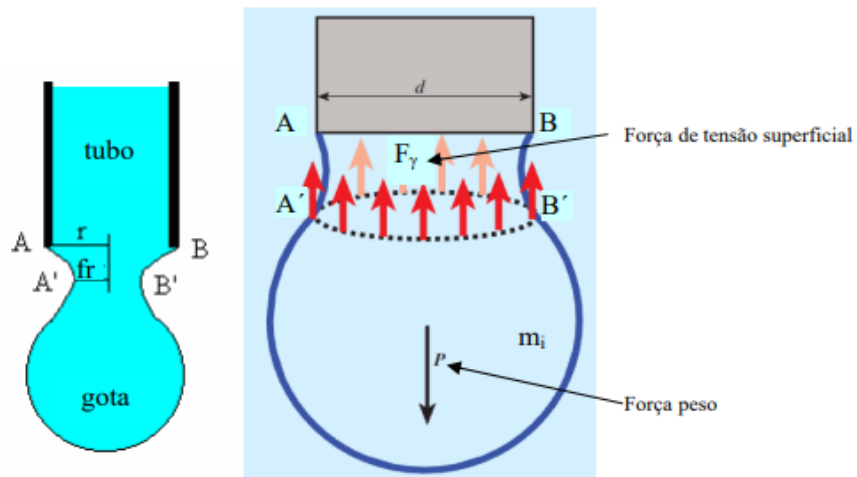
Figura 28: Estalagmômetro.



Fonte: Autoria própria (2022)

O estalagmômetro consiste em um medidor de tensão superficial que utiliza como princípio de funcionamento o peso da gota. No momento em que a gota se desprende do equipamento, pela força exercida pelo peso da gota, a tensão superficial equilibra esse peso, como representado na Figura 29.

Figura 29: Representação do peso da gota.



Fonte: PILLING (2016)

A tensão superficial, representada por γ , pode ser calculada através da Equação 7 (BEHRING; LUCAS; BARCELLOS; 2004).

$$\gamma = \frac{m \cdot g}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot f} = \frac{V \cdot \rho \cdot g}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot f} \quad (7)$$

Onde m representa a massa da gota do líquido (gramas), g a gravidade (m/s^2), $2\pi r$ a circunferência da gota (m), V o volume da gota (ml) e ρ a densidade do líquido (g/ml).

Durante o desprendimento da gota do instrumento, a separação não ocorre de maneira esférica, como demonstrado na Figura 30. Neste caso, há a necessidade de corrigir o volume da gota através de um fator de correção (f), determinado experimentalmente.

Figura 30: Fotografia da formação de uma gota.



Fonte: PILLING (2016)

De maneira a facilitar a medida da tensão superficial, o método utilizado foi de estabelecer um volume conhecido no estalagmômetro e contabilizar a quantidade de gotas que caem durante este volume.

Para que a tensão superficial possa ser determinada, é necessário considerar um líquido conhecido como base de cálculo, que nesse caso, foi a água, cuja tensão superficial já é conhecida, permitindo realizar medidas relativas de outros líquidos. A tensão superficial de um líquido é calculada através da Equação 8.

$$\gamma_{\text{líquido}} = \frac{\gamma_{\text{água}} \cdot \rho_{\text{água}} \cdot \text{número de gotas da água}}{\rho_{\text{líquido}} \cdot \text{número de gotas do líquido}} \quad (8)$$

A tensão superficial da água, a 20°C é de 72,75 dyn/cm e a densidade da água é de 0,97 g/L (SHAWN, 1975).

Como planejamento de experimento, para cálculo da tensão superficial, foram separadas 11 amostras de 1000 mL do banho padrão de cromo e adicionado o molhador Macuplex STR NPF[®], tensoativo escolhido para a alteração, nas concentrações de 0 à 5,0 mL/L em intervalos de 0,5 mL/L

Em cada amostra, utilizando o estalagmômetro, foram coletados os dados das gotas em quadruplicata. Os valores obtidos estão representados na Tabela 2.

Tabela 2 - Separação das amostras com molhador.

Amostras	Concentração de molhador (mL/L)
Amostra 1	0
Amostra 2	0,5
Amostra 3	1,0
Amostra 4	1,5
Amostra 5	2,0
Amostra 6	2,5
Amostra 7	3,0
Amostra 8	3,5
Amostra 9	4,0
Amostra 10	4,5
Amostra 11	5,0

Fonte: Autoria Própria (2022)

4.4 Determinação da densidade

Para determinar a densidade do líquido, foi feita a pesagem de um volume conhecido do líquido e dividido por esse volume, como representa a Equação 9.

$$\rho = \frac{\text{peso da amostra}}{\text{volume da amostra}} \quad (9)$$

A unidade da densidade é em g/mL, o peso da amostra em gramas e o volume da amostra em mL.

Para a medição de um volume conhecido foi utilizada a pipeta volumétrica de 10 mL calibrada, apresentada na Figura 31.

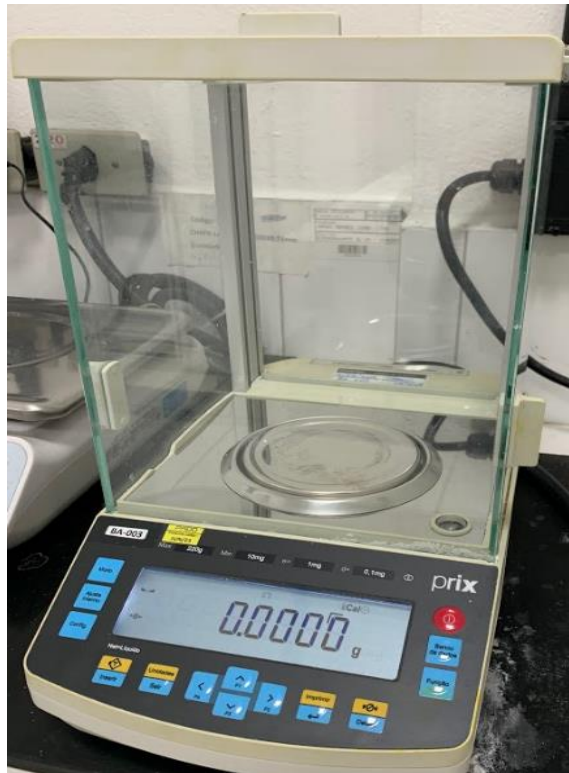
Figura 31: Pipeta volumétrica de 10 mL.



Fonte: Autoria Própria (2022)

A pesagem foi realizada em uma balança analítica da marca Pnix®, com precisão de quatro casas decimais, 0,0001 gramas, e capacidade máxima de 220 gramas, representada pela Figura 32. A resolução de quatro casas decimais permite uma medida feita com maior precisão.

Figura 32: Balança analítica.



Fonte: Autoria Própria (2022)

Outro método para determinação da densidade é através do equipamento densímetro, que é composto por uma haste que contém a escala, um bulbo e um lastro de chumbo, como representado na Figura 33.

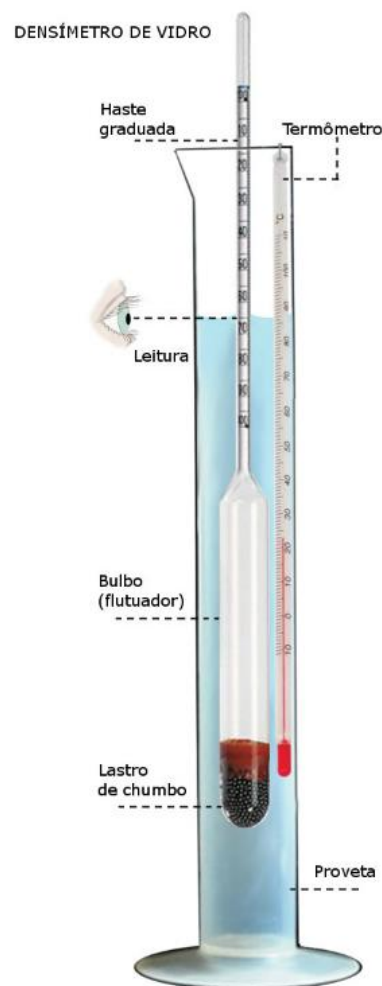
Figura 33: Representação de um densímetro.



Fonte: MEDE (2022)

O princípio do funcionamento do densímetro é a flutuabilidade, de maneira que ao mergulhar o equipamento no líquido, o mesmo afunda até deslocar o volume de fluido que equivale ao seu peso, de maneira que flutue quando estiver no equilíbrio. O volume deslocado terá a sua superfície indicando na escala a densidade do líquido. Para realizar a medição, é utilizado uma proveta de 1 litro e preenchida com o líquido, em seguida, mergulha-se o densímetro e faz a leitura da densidade indicada na haste, como representado na Figura 34.

Figura 34: Medição do densímetro.



Fonte: MEDE (2022)

A densidade determinada no densímetro pode ser relacionada com a escala baumé, representada por °Bé, que mede a quantidade de materiais sólidos dispersos

na solução (SCHWENGBER; SCHIEDECK; GONÇALVES, 2007). Para líquidos menos densos que a água é utilizada a Equação 10 (SURTEC, 20019).

$$^{\circ}Bé = \left(\frac{140}{\rho}\right) - 130 \quad (10)$$

Para líquidos mais densos que a água é utilizada a Equação (11).

$$^{\circ}Bé = 145 - \left(\frac{145}{\rho}\right) \quad (11)$$

A Tabela 3 traz os valores de $^{\circ}Bé$ para densidades maiores que da água, calculadas através da Equação 11.

Tabela 3 - Relação $^{\circ}Bé$ com a densidade para líquidos mais densos que a água.

$^{\circ}Bé$	Densidade (g/L)	$^{\circ}Bé$	Densidade (g/L)
1	1,007	21	1,171
2	1,014	22	1,180
3	1,021	23	1,190
4	1,029	24	1,200
5	1,036	25	1,210
6	1,043	26	1,220
7	1,051	27	1,231
8	1,059	28	1,241
9	1,067	29	1,252
10	1,075	30	1,263
11	1,083	31	1,274
12	1,091	32	1,286
13	1,108	33	1,297
14	1,116	34	1,309
15	1,125	35	1,321
16	1,134	36	1,333
17	1,146	37	1,346
18	1,152	38	1,358
19	1,161	39	1,371
20	1,171	40	1,385

Fonte: SURTEC (2009)

Através da Tabela 4 ainda é possível relacionar os $^{\circ}Bé$ com a concentração de ácido crômico.

Tabela 4 - Tabela de conversão de °Bé para g/L de ácido crômico.

°Bé	Concentração de Ácido Crômico (g/L)	°Bé	Concentração de Ácido Crômico (g/L)
15,00	165,0	22,50	264,0
15,50	170,0	23,00	270,0
16,00	178,0	23,50	278,0
16,50	184,0	24,00	286,0
17,00	190,0	24,50	293,0
17,50	197,0	25,00	300,0
18,00	204,0	25,50	307,0
18,50	211,0	26,00	314,0
19,00	218,0	26,50	322,0
19,50	224,0	27,00	330,0
20,00	230,0	27,50	338,0
20,50	236,0	28,00	345,0
21,00	243,0	28,50	353,0
21,50	250,0	29,00	361,0
22,00	257,0	29,50	368,0

Fonte: SURTEC (2009)

Para que seja feita a medida da concentração de ácido crômico através do densímetro, é necessário que o banho esteja à temperatura ambiente. Sendo assim, o banho foi resfriado, naturalmente, até atingir a temperatura de 25°C e divididos em recipientes de 1000 mL, como representado na Tabela 2. Para determinar a densidade, as amostras foram colocadas em uma proveta de 1 litro e colocou-se o medidor no líquido, em seguida, foi feita a relação entre densidade, °Bé e concentração de ácido crômico.

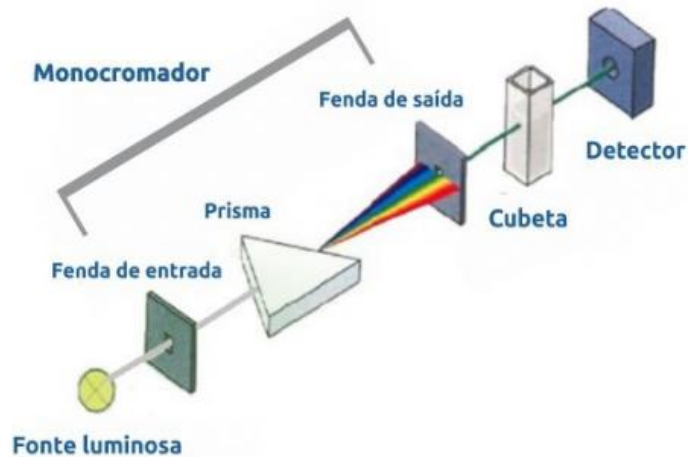
4.5 Determinação da concentração de cromo na água

A determinação da concentração de cromo na água foi feita através da metodologia de espectrofotometria, que consiste em medir e comparar a quantidade de luz que uma solução absorve, sendo proporcional a concentração da mesma, partindo do princípio que cada composto transmite ou absorve a luz em certo comprimento de onda.

O espectrofotômetro é composto por uma fonte de luz, o monocromador que transforma a luz incidida de vários comprimentos de onda em um só comprimento, transformando em luz monocromática. Uma cubeta que é um recipiente transparente, normalmente de quartzo, vidro ou acrílico, que são utilizadas para colocar a amostra e, por fim, o detector, que é responsável por detectar a fração de luz que passou pela

amostra e transferir para o visor (SINERGIA, 2022). O esquema está representado na Figura 35.

Figura 35: Esquemática do funcionamento de espectrofotômetro.



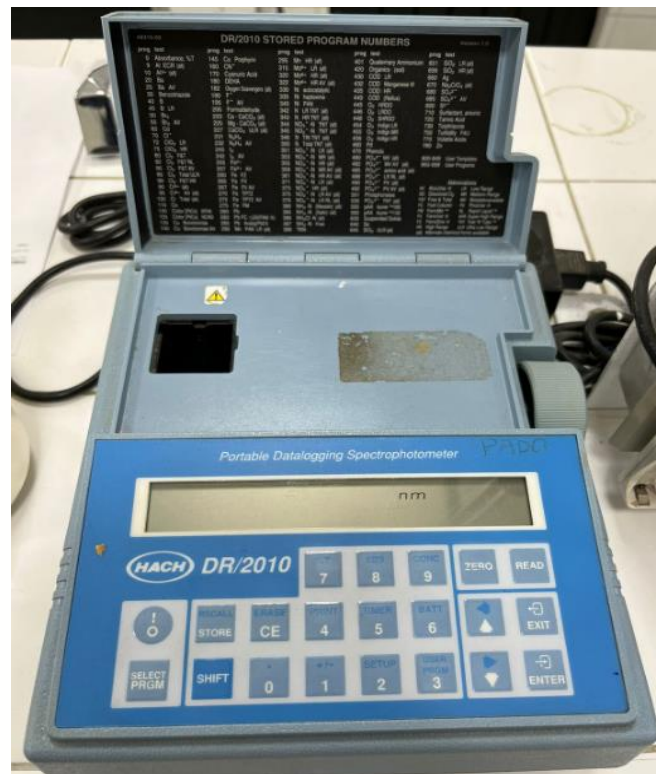
Fonte: SINERGIA (2022)

Para a identificação do cromo hexavalente na solução é utilizado o método baseado na reação do cromo hexavalente com a difenilcarbazida, em condições de pH de 1,6 a 2,2 e o comprimento de onda para que ocorra total absorvância é de 540 nm (JUNIOR et. al, 2007).

Inicialmente foi colocado 5 mL da solução originada da estação de tratamento de efluentes de empresa, dentro da cubeta, em seguida foi feita a acidificação para que evite a solubilização de espécies de cromo trivalentes presentes na solução e evita também a redução do cromo hexavalente na presença de compostos orgânicos da amostra. Por fim, foi feita a adição do difenilcarbazida com os demais reagentes para que ocorra a reação.

A cubeta com a solução e os reagentes foi colocada no espectrofotômetro, representado pela Figura 36, e configurado para a onda de comprimento de 540 nm.

Figura 36: Espectrofotômetro.



Fonte: Autoria Própria (2022)

Para a obter os valores de concentração de cromo, este modelo de espectrofotômetro possui um banco de dados com métodos para as determinações das concentrações para diferentes compostos já pré-definidos, como apresentado na Figura 37.

Figura 37: Banco de dados do espectrofotômetro

49315-00		DR/2010 STORED PROGRAM NUMBERS				Version 1.0
prog test	prog test	prog test	prog test	prog test	prog test	
0 Absorbance, %T	145 Cu Porphyrin	295 Mn HR (alt)	401 Quaternary Ammonium	651 SiO ₂ LR (alt)		
9 Al ECR (alt)	160 CN ⁻	315 Mo ⁶⁺ LR (alt)	420 Organics (soil)	656 SiO ₂ HR (alt)		
10 Al ³⁺ (alt)	170 Cyanuric Acid	320 Mo ⁶⁺ HR (alt)	430 COD LR	660 Ag		
20 Ba	180 DEHA	322 Mo ⁶⁺ HR AV (alt)	432 COD Manganese III	670 Na ₂ CrO ₄ (alt)		
25 Ba AV	182 Oxygen Scavengers (alt)	330 Ni autocatalytic	435 COD- HR	680 SO ₄ ²⁻		
30 Benzotriazole	190 F ⁻	335 Ni heptoxime	440 COD (Reflux)	685 SO ₄ ²⁻ AV		
40 B	195 F ⁻ AV	340 Ni PAN	445 O ₂ HRDO	690 S ²⁻		
45 B LR	200 Formaldehyde	342 N LR TNT (alt)	446 O ₂ LRDO	710 Surfactant, anionic		
50 Br ₂	220 Ca - CaCO ₃ (alt)	343 N HR TNT (alt)	448 O ₂ SHRDO	720 Tannic Acid		
55 Br ₂ AV	225 Mg - CaCO ₃ (alt)	344 NO ₃ ⁻ -N TNT (alt)	454 O ₃ Indigo LR	730 Tolytriazole		
60 Cd	227 CaCO ₃ ULR (alt)	345 NO ₂ ⁻ -N TNT (alt)	455 O ₃ Indigo MR	750 Turbidity FAU		
70 Cl ⁻	231 N ₂ H ₄	346 N TIN TNT (alt)	456 O ₃ Indigo HR	770 Volatile Acids		
72 ClO ₂ LR	232 N ₂ H ₄ AV	350 N Total TNT (alt)	460 Pd	780 Zn		
75 ClO ₂ HR	240 I ₂	351 NO ₃ ⁻ -N LR (alt)	470 Phenols			
80 Cl ₂ F&T	242 I ₂ AV	353 NO ₃ ⁻ -N MR (alt)	480 PO ₄ ³⁻ MV (alt)	900-949 User Templates		
82 Cl ₂ F&T RL	255 Fe ²⁺	355 NO ₃ ⁻ -N HR (alt)	482 PO ₄ ³⁻ MV AV (alt)	950-999 User Programs		
85 Cl ₂ F&T AV	257 Fe ²⁺ AV	359 NO ₃ ⁻ -N MR AV (alt)	485 PO ₄ ³⁻ amino acid (alt)			
86 Cl ₂ Total ULR	260 Fe FZ	361 NO ₃ ⁻ -N HR AV (alt)	488 PO ₄ ³⁻ LR RL (alt)			
88 Cl ₂ F&T HR	265 Fe FV	371 NO ₂ ⁻ -N LR (alt)	490 PO ₄ ³⁻ PV (alt)			
90 Cr ⁶⁺ (alt)	267 Fe FV AV	373 NO ₂ ⁻ HR (alt)	492 PO ₄ ³⁻ PV AV (alt)			
95 Cr ⁶⁺ AV (alt)	270 Fe TPTZ	375 NO ₂ ⁻ -N LR AV (alt)	501 Phosphonates			
100 Cr Total (alt)	272 Fe TPTZ AV	376 NO ₂ ⁻ -N LR RL (alt)	535 PO ₄ ³⁻ TNT (alt)			
110 Co	275 Fe FM	380 NH ₃ -N (Nessler) (alt)	555 pAA Acumer™1000			
120 Color (PtCo) APHA	280 Pb	385 NH ₃ -N (Salic) (alt)	560 pAA Acumer™1100			
125 Color (PtCo) NCASI	283 Pb FC (LEADTRAK®)	386 NH ₂ Cl -N (alt)	630 Suspended Solids			
135 Cu Bicinchoninate	285 Pb Analig/PbEX	387 NH ₃ -N Free	640 Se			
140 Cu Bicinchoninate AV	290 Mn PAN LR (alt)	399 TKN	645 SiO ₂ ULR (alt)			

Abbreviations		
AV	AccuVac®	LR Low Range
DO	Dissolved O ₂	MR Medium Range
F&T	Free & Total	MV Molybdovanadate
FC	Fast Column	PV PhosVer®
FM	FerroMo™	RL Rapid Liquid™
FV	FerroVer®	SHR Super High Range
FZ	FerroZine®	TNT Test 'N Tube™
HR	High Range	ULR Ultra Low Range
(alt)	Alternate chemical forms available	

Fonte: Autoria Própria (2022)

Quando não há essa programação, é feita a curva de calibração com soluções de concentração de cromo conhecida, para determinar a equação que relaciona a absorbância com a concentração.

4.6 Consumo de insumos

A análise de consumo dos insumos foi feita através do levantamento da quantidade de insumos utilizados anteriormente à mudança do tensoativo e as quantidades utilizadas após a alteração. Inicialmente o banho de cromo era composto pelo Composto Macchrome® e pelo tensoativo Mac Névoa®, no período de transição, foram utilizados o Composto Macchrome®, o tensoativo Mac Névoa® e o tensoativo Macuplex STR NPFX® e, após o período de troca, somente o composto Macchrome® e o tensoativo Macuplex STR NPFX®.

Para a coleta dos dados foi utilizado o sistema de armazenamentos de dados da empresa, fazendo o levantamento do período anterior a mudança de janeiro de 2020 até dezembro de 2020, período da mudança de janeiro de 2021 até dezembro de 2021, onde a troca ocorreu em outubro desse ano, e o período após a troca que foi de janeiro de 2022 até outubro de 2022.

4.7 Produção de peças cromadas

O levantamento de dados da produção foi feito baseado nos períodos em que houve a alteração dos insumos, nos anos de 2020, 2021 e até o mês de outubro do ano de 2022. Assim como os insumos, a coleta dos dados de produção foi feita através do sistema interno da empresa que utiliza a ferramenta Power BI para armazenar e analisar tais dados

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Tensão superficial

Através da metodologia utilizada para a determinação da tensão superficial, os dados obtidos pela contagem de gotas de solução de cromo com adição tensoativo e suas respectivas médias estão representados pela Tabela 5.

Tabela 5 - Medidas de gotas do estalagmômetro.

Amostras	Concentração de molhador (mL/L)	Número de Gotas				Média de Gotas	Desvio Padrão
		1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a		
Amostra 1	0	19	19	19	19	19	0,00
Amostra 2	0,5	20	20	20	20	20	0,00
Amostra 3	1,0	23	22	23	24	23	0,82
Amostra 4	1,5	25	26	26	26	25,75	0,50
Amostra 5	2,0	39	37	37	38	37,75	0,96
Amostra 6	2,5	39	39	39	40	39,75	0,50
Amostra 7	3,0	39	40	38	38	38,75	0,96
Amostra 8	3,5	42	43	42	42	42,75	0,50
Amostra 9	4,0	43	44	43	43	43,75	0,50
Amostra 10	4,5	44	45	45	44	44,5	0,58
Amostra 11	5,0	47	50	50	49	49	1,41

Fonte: Autoria Própria (2022)

A partir das medidas de gotas já é possível observar a diferença da média de gotas para cada amostra, conforme aumenta a concentração, aumenta o número de gotas contadas, demonstrando que a tensão superficial está diminuindo através da velocidade com que as gotas caem, pois em um mesmo intervalo de volume houve uma maior contagem das mesmas.

A medida da densidade foi feita através da utilização do densímetro, visando determinar a concentração de ácido crômico da solução somente para confirmar se o

valor obtido está na faixa de valor desejado, que é de 1,210 g/L. Os dados obtidos pela medição da densidade por densímetro estão representados na Tabela 6.

Tabela 6 - Medidas de densidade por densímetro.

Amostras	Concentração de molhador (mL/L)	Densidade (g/L)
Amostra 1	0	1,210
Amostra 2	0,5	1,210
Amostra 3	1,0	1,210
Amostra 4	1,5	1,210
Amostra 5	2,0	1,210
Amostra 6	2,5	1,210
Amostra 7	3,0	1,210
Amostra 8	3,5	1,210
Amostra 9	4,0	1,210
Amostra 10	4,5	1,210
Amostra 11	5,0	1,210

Fonte: Aatoria Própria (2022)

A partir dos valores de densidades obtidos anteriormente, foi possível determinar a relação entre densidade, graus Baumé e concentração do ácido crômico, que no valor desejado deve ser de 300 g/L.

Todos os valores de densidade coletados estavam dentro do valor desejados de 300 g/L de concentração e, a partir desses dados é possível observar que as concentrações de ácido crômico não variaram com a adição do surfactante.

Para a determinação da tensão superficial, foi calculada a densidade através do volume de amostra conhecido e seu peso, utilizando a Equação 9 para obter esse valor. A utilização desse método garante maior precisão, já que são utilizados materiais calibrados, como pipeta volumétrica e balança analítica. Os valores obtidos estão reunidos na Tabela 7.

Tabela 7 - Medidas de densidade através do peso.

Amostras	Concentração de molhador (mL/L)	Densidade (g/L) (Calculada)
Amostra 1	0	1,1964
Amostra 2	0,5	1,1945
Amostra 3	1,0	1,1976
Amostra 4	1,5	1,1966
Amostra 5	2,0	1,1973
Amostra 6	2,5	1,1928
Amostra 7	3,0	1,1932
Amostra 8	3,5	1,1945
Amostra 9	4,0	1,1937
Amostra 10	4,5	1,1942
Amostra 11	5,0	1,1936

Fonte: Autoria Própria (2022)

A diferença entre a densidade calculada e a densidade obtida através do densímetro pode ser dada pelo erro de visualização do leitor, já que depende da observação do menisco da solução, enquanto a calculada é mais precisa. Porém, é importante analisar que no método analítico todos os valores se encontram bem próximos, variando apenas após a terceira casa decimal.

A partir dos dados de densidade calculada e da média de gotas, a tensão superficial foi calculada utilizando a Equação 8, resultando nos valores apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Tensão superficial das amostras.

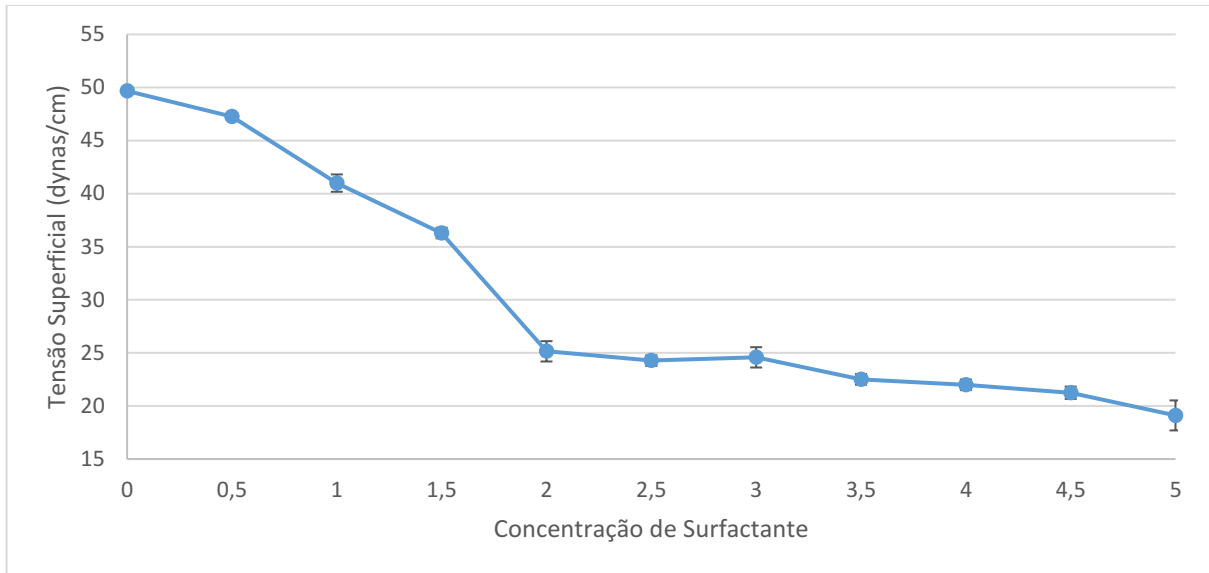
Amostras	Concentração de molhador (mL/L)	Média de Gotas	Tensão Superficial (dynas/cm)
Amostra 1	0	19	49,67
Amostra 2	0,5	20	47,26
Amostra 3	1,0	23	40,99
Amostra 4	1,5	25,75	36,29
Amostra 5	2,0	37,75	25,15
Amostra 6	2,5	39,75	24,27
Amostra 7	3,0	38,75	24,58
Amostra 8	3,5	42,75	22,51
Amostra 9	4,0	43,75	21,99
Amostra 10	4,5	44,5	21,25
Amostra 11	5,0	49	19,11

Fonte: Autoria Própria (2022)

A tensão superficial calculada para as 11 amostras apresenta grande diferença em seus valores, onde o aumento da concentração do molhador resulta na

redução da tensão superficial. A projeção desses valores está representada no gráfico da Figura 38.

Figura 38: Gráfico da tensão superficial em função da concentração do tensoativo.



Fonte: Autoria Própria (2022)

O ponto em que a tensão superficial diminui acentuadamente, é o ponto de inflexão, a partir desse ponto é determinada a concentração micelar crítica, CMC, iniciando a formação de micelas na solução. De acordo com os valores, o ponto de CMC é obtido no valor de tensão superficial igual a 25,25 dynas/cm, referente à amostra 5 com adição de 2,0 mL/L de tensoativo.

Os dados obtidos experimentalmente condizem com os dados oferecidos pelo fornecedor do tensoativo, que indica a concentração ideal do molhador no intervalo de 2,0 a 3,0 mL/L.

Após o ponto de concentração micelar crítica, em concentrações maiores que essa ocorre uma constância no valor da tensão superficial, causando uma pequena variação nos valores, não sendo tão significativo quanto os valores antecedentes à CMC. Do valor de tensão superficial da amostra 1, sem adição de nenhum tensoativo, até o valor da amostra 5, referente ao ponto de CMC, houve uma redução de 49,36% da tensão superficial da solução de cromo.

Com a redução da tensão superficial no banho de cromo, o esperado é que a concentração de cromo na água destinada ao tratamento de água e esgoto tenha diminuído, já que um dos motivos da adição do surfactante é de diminuição da

quantidade de cromo arrastada para as águas de enxágue consequentes ao banho de cromo.

Para que seja possível fazer a comparação entre os valores referentes ao período antecedente e posterior à troca de surfactante, é necessário considerar a produtividade da empresa, em especial, a produção de peças cromadas. O ano de 2020 é referente ao ano antecedente ao ano da troca, em 2021 foi realizada a mudança, em específico, no mês de outubro e em 2022 é o ano posterior à troca.

5.2 Produção de peças cromadas

Os dados de produção de peças cromadas durante os períodos citados anteriormente estão representados pela Tabela 9, onde foi colocado somente a somatória das peças daquele ano para maior simplificação. As peças cromadas representam as maçanetas, rosetas, hastes e demais componentes que foram passados no banho de cromo.

Tabela 9 - Produção de peças cromadas.

Ano	Produção de peças cromadas
2020	132.096
2021	260.011
2022	3.104.896

Fonte: Aatoria Própria (2022)

5.3 Concentração de cromo na água efluente

Através da metodologia citada anteriormente, os dados de concentração de cromo na água destinada ao tratamento referentes ao período de janeiro de 2020 a janeiro de 2022 foram retirados do histórico de análise, enquanto os dados de fevereiro de 2022 até outubro de 2022 foram coletados no presente. Visando simplificar a quantidade de valores apresentados nas tabelas, os dados de concentração de cromo na água foram reduzidos em média mensal dos anos de 2020, 2021 e 2022. Nos três anos as coletas foram diárias, e calculadas as médias durante os meses e, por fim, calculada a média para o ano. Os dados obtidos estão representados na Tabela 10.

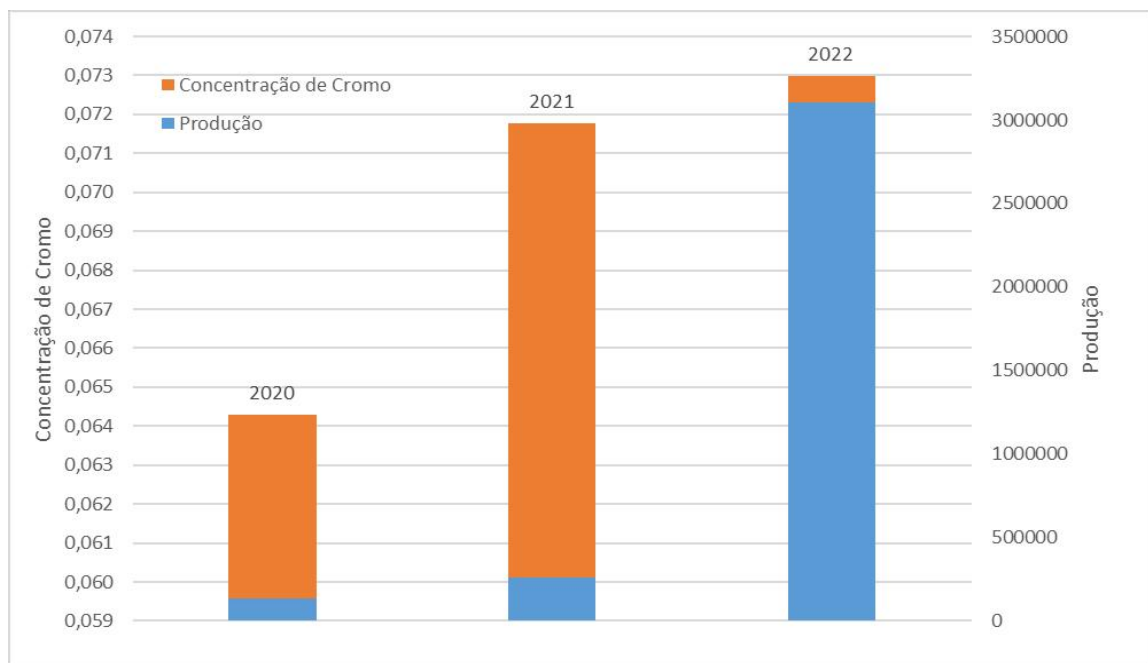
Tabela 10 - Concentração de cromo na água efluente do processo galvânico.

Ano	Média Mensal (mg/L)												Média Anual (mg/L)
	Jan	Fev	Ma	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
2020	0,070	0,040	0,060	0,040	0,060	0,070	0,070	0,070	0,080	0,070	0,070	0,070	0,064
2021	0,060	0,080	0,080	0,080	0,070	0,080	0,080	0,080	0,070	0,050	0,060	0,060	0,072
2022	0,060	0,080	0,080	0,070	0,070	0,080	0,070	0,070	0,080	0,070	-	-	0,073

Fonte: Autoria Própria (2022)

Analisando os valores apresentados na Tabela 10, pode-se observar que não houve redução na média anual da concentração de cromo na água de efluente do processo galvânico, porém, quando comparado com a produção dos anos, percebe-se que em 2021 houve um aumento de 16,67% na concentração de cromo comparado com o ano anterior, 2020, enquanto a produção aumentou em 97%. Já no ano de 2022, a concentração de cromo aumentou 1,39%, enquanto a produção aumentou aproximadamente 1094%. Os dados de produção e da concentração de cromo estão presentes no gráfico da Figura 39.

Figura 39: Gráfico da concentração de cromo na água de enxágue e da produção.



Fonte: Autoria Própria (2022)

Através do gráfico apresentado na Figura 39 é possível analisar a relação entre a produção, representada pela cor azul, em relação à concentração de cromo, representada pela cor laranja. Nos anos de 2020, cada 0,01 mg/L é referente a

produção de 20.640 peças, em 2021 é referente a 36.112 peças e em 2022, a mesma concentração é referente a 425.328 peças cromadas. Portanto do período de 2020 a 2022, com a mesma concentração de cromo, de 0,01 mg/L, foi possível produzir 389.215 peças a mais. Com esses valores obtidos é possível já justificar a mudança para um novo tensoativo, pois é evidente que houve a redução de arraste de banho de cromo para as próximas etapas, já que com o aumento muito significativo da produção, a concentração de cromo na água se manteve estável.

O arraste de banho pela peça de cromo, além do impacto na concentração de cromo na água de enxágue, afeta diretamente no consumo de produtos químicos para a composição desse banho. Isso devido ao arraste reduzir o nível de banho do tanque de eletrodeposição, sendo necessário fazer o reforço para manter o nível e a concentração ideal desejada.

5.4 Análise de insumos e econômica

Para que a análise econômica seja feita, os valores de insumos anuais e suas respectivas quantidades dos períodos citados anteriormente, coletados através da metodologia citada, estão representados na Tabela 11.

Tabela 11 - Consumo de insumos para banho de cromo.

Ano	Componente	Quantidade (Kg)	Valor Individual do Componente (R\$/mês)	Total (R\$/ano)
2020	Composto Macchrome	2.325	R\$71.975,48	R\$76.516,22
	Mac Névoa	450	R\$4.540,75	
2021	Composto Macchrome	1.800	R\$ 57.066,14	R\$64.400,05
	Mac Névoa	100	R\$1.018,52	
	Macuplex STR NPFEX	40	R\$ 7.894,24	
2022	Composto Macchrome	1.250	R\$ 60.395,12	R\$61.184,54
	Macuplex STR NPFEX	20	R\$ 3.947,12	

Fonte: Autoria Própria (2022)

Mais uma vez os dados de produção anual de peças cromadas serão utilizados como parâmetros de comparação para as quantidades consumidas e seus respectivos valores.

Primeiramente, serão comparadas as quantidades consumidas de cada produto pela quantidade de peças produzidas. Os valores obtidos estão representados na Tabela 12.

Tabela 12 - Consumo de insumos para banho de cromo e quantidade de insumos por peça.

Ano	Componente	Quantidade (Kg)	Produção Anual (Peças)	Quantidade de insumo consumido por peça (g/peça)
2020	Composto Macchrome	2.325	132.096	17,60
	Mac Névoa	450		3,41
2021	Composto Macchrome	1.800	260.011	6,92
	Mac Névoa	100		0,38
	Macuplex STR NPFX	40		0,15
2022	Composto Macchrome	1.250	3.104.896	0,40
	Macuplex STR NPFX	20		0,006

Fonte: Autoria Própria (2022)

Através da quantidade de cada insumo consumido e da produção, é possível determinar qual a quantidade de insumo gasta para produzir uma única peça. Para que os dados não fiquem em valores tão baixos, foi utilizado como base de cálculo o peso de insumos em gramas. Primeiramente será feita a análise do Composto Macchrome®, que no ano de 2020 foi consumido 2.325 Kg do composto, resultando em 17,6 gramas de composto por peça. No ano de 2021, o total consumido foi de 1.800 Kg, sendo redistribuído por peças, resultando em aproximadamente 6,22 gramas de composto por peça. Por fim, em 2022 foram consumidos 1.250 Kg de Composto Macchrome®, resultando em 0,40 gramas de composto por peça.

Analisando o surfactante, quando utilizado o composto Mac Névoa® em 2020, o consumo total foi de 450 Kg, resultando em 3,4 gramas de tensoativo por peça. Em 2021, foram consumidos 100 Kg de Mac Névoa® e 40 Kg de Macuplex STR NPFX®, resultando em 0,38 e 0,15 gramas por peça para cada tensoativo, respectivamente. Por fim, no ano de 2022, foram consumidos apenas 20 Kg do surfactante, resultando em 0,006 gramas por peça.

Se a produção de 2022 tivesse sido feita em 2022, considerando a quantidade de insumos consumida por cada peça, tem-se os dados apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Comparação da produção de 2022 com as quantidades de insumo de 2020.

Ano	Componente	Quantidade (Kg)	Produção Anual (Peças)	Quantidade de insumo consumido por peça (Kg/peça)
2020	Composto Macchrome	2.325	132.096	0,0176
	Mac Névoa	450		0,0034
2022	Composto Macchrome	24.648	3.104.896	0,0176
	Macuplex STR NPFX	10.577		0,0034

Fonte: Autoria Própria (2022)

Analisando os dados da Tabela 13, teriam sido gastos aproximadamente 54650 Kg de Composto Macchrome ® e 10.600 Kg de tensoativo Mac Névoa para realizar a mesma produção de 2022, comparando esses valores com os valores consumidos em 2022, resulta em uma diferença de 53.400 Kg de Composto Macchrome ® e 10.580 Kg de tensoativo.

Partindo para a análise econômica, com os dados das Tabelas 9 e 11 foi possível calcular o valor gasto para produzir cada peça de acordo com os gastos de insumos. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Valor de insumos para banho de cromo e valor de insumos por peça.

Ano	Componente	Quantidade (Kg)	Valor Individual do Componente (R\$/mês)	Total (R\$/ano)	Produção Anual (Peças)	Valor total por peça (R\$/peça)
2020	Composto Macchrome	2.325	R\$71.975,48	R\$76.516,22	132.096	R\$0,58
	Mac Névoa	450	R\$4.540,75			
2021	Composto Macchrome	1.800	R\$57.066,14	R\$64.400,05	260.011	R\$0,25
	Mac Névoa	100	R\$1.018,52			
	Macuplex STR NPFX	40	R\$6.315,38			
2022	Composto Macchrome	1.250	R\$60.395,12	R\$61.184,54	3.104.896	R\$0,02
	Macuplex STR NPFX	20	R\$789,42			

Fonte: Autoria Própria (2022)

Em 2020 o valor gasto de insumo referente a cada peça foi de R\$0,58, enquanto em 2021 foi de R\$0,25 e em 2022 foi de R\$0,02. A redução do valor gasto com insumo pela quantidade de peças produzidas, de 2020 para 2021 foi de 57,24%, enquanto a de 2021 para 2022 foi de 92,04%. Quando comparados os anos de 2020 e 2022, o valor total mensal de insumos pela quantidade de peças produzidas no ano teve uma redução de 96,6%.

Se análogo à comparação feita pela quantidade de insumos por peça for feita entre a produção de 2022 com o valor gasto de insumo por peça de 2020, tem-se os dados apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Comparação da produção de 2022 com as quantidades de insumo de 2020.

Ano	Componente	Total (R\$/ano)	Produção Anual (Peças)	Valor total por peça (R\$/peça)
2020	Composto Macchrome Mac Névoa	R\$76.516,22	132.096	R\$0,58
2022	Composto Macchrome Macuplex STR NPFx	R\$1.798.502,00	3.104.896	R\$0,58

Fonte: Aatoria Própria (2022)

De acordo com a Tabela 15, a produção de 2022 resultaria em um gasto anual de R\$1.798.502,00 com os valores de 2020, resultando em uma diferença de R\$1.737.317,46 quando comparado com o real valor gasto em 2022. Assim como a quantidade de insumos, houve uma redução de gasto de produção anual de 96,6% com a mudança de tensoativo.

6 CONCLUSÃO

Os dados experimentais de tensão superficial mostram que é possível observar o efeito que o tensoativo causa em uma solução, e a determinação do ponto de concentração micelar crítica, CMC, no intervalo de 2,0 a 3,0 mL/L, mostrando a eficiência do surfactante na redução da tensão superficial.

Em relação ao impacto desta redução na concentração de croma na água no tratamento, os resultados exibiram que o aumento significativo da produção de 2022 causou um pequeno aumento de 0,01 mg/L quando comparado ao ano anterior, indicando a aplicabilidade favorável do tensoativo.

Outro fator afetado pela redução do arraste foi o consumo de insumos para reforço e montagem do banho, que pode ser observado principalmente no composto de ácido crômico, que de 2020 a 2022 houve uma redução de 97,73% de consumo por peça.

A redução de consumo de insumos verificada neste estudo tem potencial impacto nos custos do processo. Em 2020 o valor gasto de insumos para produzir uma única peça foi de R\$0,58, enquanto em 2022 foi de R\$0,02, reduzindo 96,55% do custo por peça. Fazendo uma comparação semelhante ao consumo de insumo, se a produção de 2022 fosse feita com o valor de 2020, o custo anual teria sido de

R\$1.798.502,00 enquanto na realidade foi de R\$61.184,54, com potencial de economia de R\$ 1.737.317,46.

A alteração de um surfactante para outro, que supre as necessidades de formação de névoa e reduz a tensão superficial, prevendo a estabilidade do banho, foi eficaz para o processo.

Por fim, este estudo mostrou resultados consistentes no atendimento ao objetivo principal, pela diminuição de arraste de cromo nas peças, impactando em ganho econômico e ambiental ao processo de galvanoplastia avaliado.

REFERÊNCIAS

- BEHRING, J. L.; LUCAS, M.; BARCELLOS, I. O. Adaptação no método do peso da gota para determinação da tensão superficial: um método simplificado para a quantificação da CMC de surfactantes no ensino da química. *Química Nova*, v. 27, n. 3, p. 492-495, 2004.
- BIELICKA, A.; BOJANOWSKA, I.; WISNIEWSKI, A. Two Faces of Chromium - Pollutant and Bioelement. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2005.
- BOFF, D. R. O processo de cromo duro: Do hexavalente convencional ao trivalente, 2020. Disponível em: <https://www.portals.com.br/wp-content/uploads/2020/06/TS-219-36_39-materia-tecnica-Coventya-b8-comunicacao.pdf>. Acesso em: 20 Out. 2020.
- BRENNER, A. *Electrodeposition of Alloys*. New York, 1963.
- CONAMA. Resolução nº 430, de 13 de Maio de 2011, do Conselho Nacional do Meio Ambiente.
- DAL-BÓ, A. G. Associação de micelas mistas de surfactantes aniônicos com o polímero hidrofobicamente modificado etil(hidroxietil) celulose (EHEC). Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.
- EUROLAB. Teste de Perfluorooctano Sulfonato (PFOS) e Ácido Perfluorooctanóico (PFOA), 2019. Disponível em: <[https://www.laboratuvar.org/pt/tekstil/kimyasal-ve-ekolojik-testler/perflorooktan-sulfonat-\(pfos\)-ve-perfluorooktanoik-asit-\(pfoa\)-testi/](https://www.laboratuvar.org/pt/tekstil/kimyasal-ve-ekolojik-testler/perflorooktan-sulfonat-(pfos)-ve-perfluorooktanoik-asit-(pfoa)-testi/)>. Acesso em: 13 Dez. 2022.
- FAVERO, B. M. Tratamento de efluentes galvânico de cromo através de eletrocoagulação e reuso do lodo como pigmento inorgânico. SEFIC, 2018.
- FEUP. Tensão Superficial. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014. Disponível em: <<https://biblioteca.fe.up.pt/arquivo/glossario/tensao-superficial/index.html>>. Acesso em: 27 Out. 2022.
- GALVÃO, L. A. C.; COREY, G. Cromo. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud. México, 1987.
- GAMBURG, Y. D.; ZANGARI, G. *Theory and Practice of Metal Electrodeposition*. New York, 2011.
- HELENE, L. P. I. Diagnóstico ambiental de solo contaminado por cromo de curtume em Motuca (SP) por métodos geofísicos. Universidade Estadual Paulista, 2016.
- HORMANN. Sistemas de carga - Soluções completas para maior eficiência. Disponível em: <https://cdn.hoermann-cloud.de/fileadmin/_country/kataloge/pdf/85022_Verladetechnik_PT.pdf?v=1512652237>. Acesso em: 27 Out. 2022.

JUNIOR, S. S. H. *et al.* Especificação de cromo usando método espectrofotométrico e análise multicomponente. Centro de Tecnologia Mineral, 2007.

LERNER, S. Todo o mundo está proibindo este químico cancerígeno. Mas no Brasil a produção aumentou. The Intercept Brazil, 2019. Disponível em: <<https://theintercept.com/2019/04/29/brasil-pfos-banido-pesticidas/>>. Acesso em: 13 Dez. 2022.

MACDERMID ENTHONE. AKNOR Dynes 30 MS. Arquivo Confidencial, 2022.

MACDERMID ENTHONE. Macchrome - Processo de cromo decorativo. Boletim Técnico, 2020.

MACDERMID ENTHONE. Macuplex STR NPFx - Redutor de tensão superficial. Boletim Técnico, 2020.

MEDE. Densímetro para massa específica. Mede Instrumentos de Medição, 2022. Disponível em: <<https://www.medeinstrumentos.com.br/produto/densimetro-para-massa-especifica-incoterm/>>. Acesso em: 23 Set. 2022.

MORAES, I. P.; NETO, C. B.; GLADEK, A. Redução/remoção de cromo hexavalente na água de captação subterrânea. XVII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2012. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/27610/17867>>. Acesso em: 20 Out. 2020.

NUNES, R. M.; OLIVEIRA, R. M. S.; BENINI, S. M. Avaliação do risco do cromo presente no lodo de indústria de curtume. VIII Fórum Ambiental da Alta Paulista, v. 8, n. 12, p. 222-233, 2012.

OROPEZA, M. V. C; Síntese e caracterização de nanopartículas núcle-casca depoliestireno e polimetacrilato de metila obtidas por polimerização em emulsão sem emulsificante e fotoiniciada. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.

PACHECO, C. E. M. Compilação de técnicas de prevenção à poluição para a indústria de galvanoplastia: projeto piloto de prevenção à poluição em indústrias de bijuterias no município de Limeira. São Paulo, 2002.

PARANHOS, A.; VECHIA, D.; BELTRAME, M. Capilaridade: Um fenômeno de superfície com aplicações cotidianas. XII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, 2008.

PILING, S. Prática 5 - Tensão Superficial de Líquidos. Universidade do Vale do Paraíba, 2016.

PIMENTEL, M. A. S. Controle da dosagem de metabissulfito de sódio em efluentes contendo cromo hexavalente. Rio de Janeiro, 2003.

PONTES, H. A. Tratamento de efluentes líquidos de galvanoplastia. Universidade Federal do Paraná, 2013.

PUGAS, M. S. Íons de Metais Pesados Ni, Cu e Cr em Área Impactada por Resíduos de Galvanoplastia na Região Metropolitana de São Paulo. São Paulo, 2007.

SANTANNA, V. C. Obtenção e estudo das propriedades de um novo fluido de fraturamento hidráulico biocompatível. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2003.

SANTOS, E. S. Estudo preliminar para a recuperação e reciclagem de cromo de efluentes de unidades produtoras de cartões telefônicos indutivos. CETEM, 2000.

SCHMITZ, E. P. S.; LOPES, M. C.; GARCIA, J. R. Utilização da célula de Hull como ferramenta de avaliação de eletrólitos de níquel para fins de eletrodeposição. Sociedade Brasileira de Química, 2012.

SCHWENGBER, J. E.; SCHIEDECK, G.; GONÇALVES, M. N. Preparo e utilização de caldas nutricionais e protetoras de plantas. Embrapa, 2007. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/745636/1/cart49806.pdf>>. Acesso em: 27 Set. 2022.

SHAW, D. J. Introdução à química dos colóides e de superfícies. São Paulo, 1975.

SILVA, C. S. Um estudo crítico sobre a saúde dos trabalhadores de galvânicas, por meio das relações entre as avaliações ambientais, biológicas e otorrinolaringológicas / Carlos Sérgio da Silva. – 2. ed. – São Paulo : Fundacentro, 2010

SILVA, N. T. P. Determinação da concentração micelar crítica a partir de medidas de condutividade e tensão superficial. Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, 2014.

SINERGIA. Espectrofotômetro: Para que serve? Como funciona? Quais são seus componentes?. Disponível em: <[SINISI, F. Introduction: the galvanic process. LEGOR, 2016. Disponível em: <<https://www.legor.com/en-us/introduction-the-galvanic-process>>. Acesso em: 15 Out. 2022.](https://www.sinergiacientifica.com.br/espectrofotometro-para-que-serve-como-funciona-quais-sao-seus-componentes/#:~:text=Espectrofot%C3%B4metro%20%C3%A9%20um%20aparelho%20amplamente,absorvida%20por%20uma%20determinada%20solu%C3%A7%C3%A3o.>>. Acesso em: 24 Out. 2022.</p></div><div data-bbox=)

UFMG. Tensão Superficial. 2012. Disponível em: <https://www.fisica.ufmg.br/ciclo-basico/wp-content/uploads/sites/4/2020/07/Tensao_Superficial.pdf>. Acesso em: 27 Out. 2022.

VIEIRA, P. S. Avaliação da eletrodeposição do banho de cobre ácido na produção de semijoias e folheados. Natal, 2022.