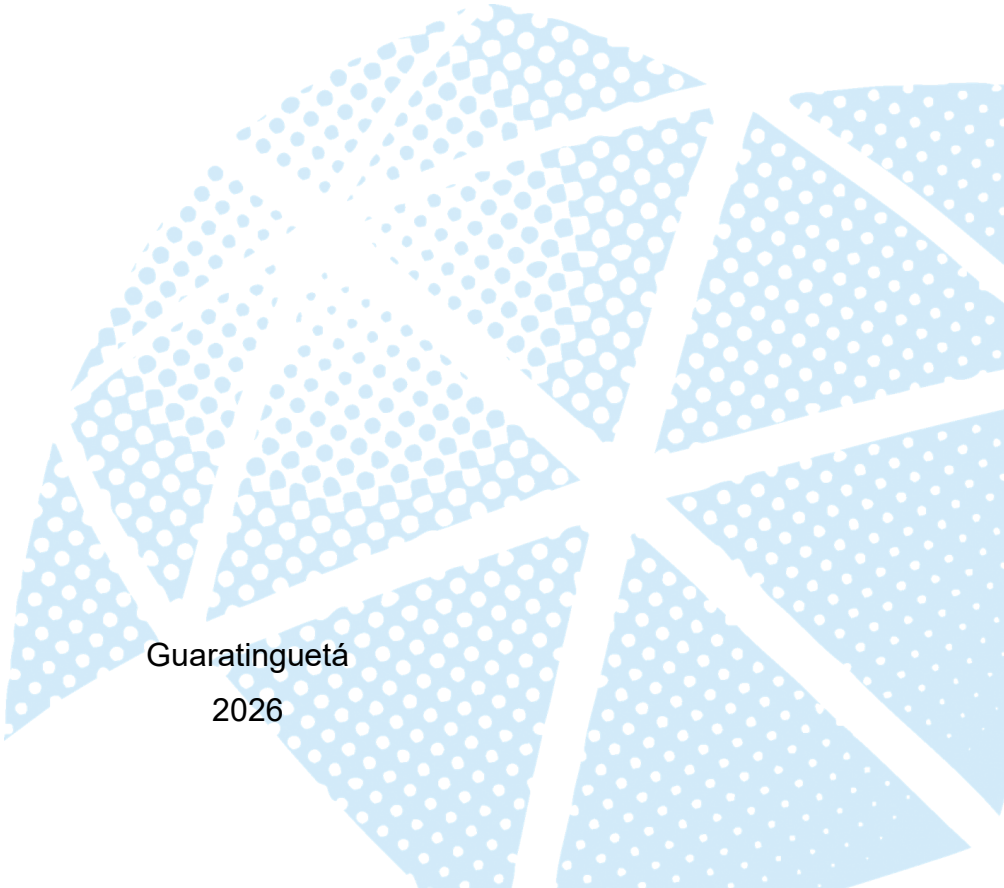


UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá

RAUL VITOR MENDES PEREIRA

MELHORIA DE UM PROCESSO DE DECAPAGEM QUÍMICA

Guaratinguetá
2026



RAUL VITOR MENDES PEREIRA

MELHORIA DE UM PROCESSO DE DECAPAGEM QUÍMICA

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Engenharia

Orientador(a): Prof. Dr. Messias Borges Silva

Coorientador(a): Prof. Dr. Lucio Garcia Veraldo Junior

Guaratinguetá

2026

P436m	Pereira, Raul Vitor Mendes Melhoria de um processo de decapagem química / Raul Vitor Mendes Pereira - Guaratinguetá, 2025. 59 f : il. Bibliografia: f. 54-58 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2025. Orientador: Prof. Dr. Messias Borges Silva Coorientador: Prof. Dr. Lucio Garcia Veraldo Junior 1. Oxidação. 2. Taguchi, Métodos (Controle de qualidade). 3. Metais - Superfícies. 4. Controle de processo. 5. Análise de variância. I. Título. CDU 66.094.3(043)
-------	--

Luciana Máximo
Bibliotecária/CRB-8 3595

RAUL VITOR MENDES PEREIRA

MELHORIA DE UM PROCESSO DE DECAPAGEM QUÍMICA.

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Data da defesa: 05/02/2026

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **MESSIAS BORGES SILVA**
Data: 26/02/2026 11:53:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. MESSIAS BORGES SILVA

Orientador - UNESP

Documento assinado digitalmente
 **MARCELA APARECIDA GUERREIRO MACHADO DI**
Data: 09/02/2026 10:59:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. MARCELA APARECIDA GUERREIRO MACHADO DE FREITAS

UNESP

**FABRICIO
MACIEL
GOMES:0462884790
884790**

Assinado digitalmente por FABRICIO
MACIEL GOMES:0462884790
ND: C=BR, O=ICP-Brasil, OU=Presencial,
OU=45218757000194, OU=Secretaria da
Receita Federal do Brasil - RFB, OU=RFB
e-CPF A1, OU=(em branco), CN=
FABRICIO MACIEL GOMES:0462884790
Razão: Eu sou o autor deste documento
Localização:
Data: 2026.02.05 14:58:26-03'00'
Foxit PDF Reader Versão: 2025.2.1

Prof. Dr. FABRÍCIO MACIEL GOMES

USP

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Este trabalho visa a disseminação da técnica de Projeto e Análise de Experimentos na indústria e oferece um potencial significativo para a expansão em empresas de menor porte, que muitas vezes não possuem o mesmo corpo técnico especializado das grandes corporações. Conforme revisão bibliográfica, esse trabalho se encontra na fronteira do conhecimento. Além de contribuir para a melhoria de processos e tomada de decisões nessas empresas, a aplicação dessa metodologia pode fortalecer a competitividade, promover a inovação e expandir o conhecimento técnico, permitindo que empresas menores alcancem melhores resultados e um crescimento sustentável no mercado brasileiro ou exterior.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This work aims to disseminate the technique of Design and Analysis of Experiments in industry and offers significant potential for expansion into smaller companies, which often lack the specialized technical staff found in large corporations. According to the literature review, this study is at the forefront of knowledge. In addition to contributing to process optimization and decision-making in these companies, the application of this methodology can strengthen competitiveness, promote innovation, and expand technical knowledge, enabling smaller companies to achieve better results and sustainable growth in both the Brazilian and international markets.

Dedico este trabalho, primeiramente à Deus, fonte de sabedoria. À minha família, em especial à minha esposa, Regiane, que sempre esteve do meu lado em todos os momentos e aos meus filhos, Pedro e Guilherme, as grandes alegrias da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por estar comigo a todo o momento. A minha família (Regiane, Pedro e Guilherme) por serem o meu suporte e porto seguro.

Agradeço também ao Prof. Dr. Messias Borges da Silva, que me aceitou novamente, após todo esse tempo, para terminar o mestrado e, ao meu grande amigo, parceiro/irmão de república, Prof. Dr. Lucio Garcia Veraldo Junior, que me incentivou ao limite para que terminasse esse mestrado, inclusive me guiando no caminho da academia.

À Maxion, na pessoa do Sr. José Quintanilha por ter possibilitado a realização dos experimentos e em um segundo momento, ao Sr. Marcelo Carneiro, por ter autorizado o término dos testes, bem como à divulgação dessas informações.

À ElringKlinger do Brasil Ltda., na pessoa do Sr. Fernando Petrolino, por todo o suporte nesta finalização de trabalho.

“Combati o bom combate, terminei a
corrida, guardei a fé.”
(2 Timóteo 4:7).

RESUMO

A decapagem química é um processo fundamental para o tratamento de superfícies metálicas em indústrias de grande porte, especialmente em ligas ferrosas sujeitas à formação de óxidos e incrustações. Contudo, a variabilidade dos fatores operacionais pode comprometer a eficiência, a qualidade e a sustentabilidade do processo. Diante desse cenário, esta pesquisa tem como objetivo principal aplicação de método de melhoria da decapagem química com base na análise experimental dos fatores mais relevantes, utilizando o Método de Taguchi. Para isso, foi realizada uma pesquisa experimental em ambiente industrial, com o delineamento de um experimento baseado em arranjo ortogonal L_{18} , considerando múltiplos fatores (como tipo de ácido, grau de oxidação, temperatura e composição do banho). Os testes foram realizados em triplicata e analisados com o auxílio do software MINITAB®, utilizando as métricas de resposta média e razão sinal-ruído (S/R). Os resultados demonstraram que o tipo de oxidação (carepa vs. oxidação de armazenamento), a ausência de controle térmico nos banhos e a composição ácida têm impacto direto no tempo de decapagem. O ácido sulfúrico (H_2SO_4) apresentou eficiência, mas com implicações ambientais; o ácido fosfórico (H_3PO_4) mostrou limitações na remoção de oxidação severa. A análise estatística permitiu identificar uma “receita de sucesso” para minimizar o tempo de exposição das peças. A pesquisa confirma que a aplicação de técnicas estatísticas de planejamento e análise de experimentos pode transformar processos empíricos em operações baseadas em evidências, com ganhos significativos de eficiência em produtividade (30% em um turno) e controle (temperatura controlada).

Palavras-chave: Decapagem química; Melhoria de processos; Método de Taguchi; Eficiência operacional.

ABSTRACT

Chemical pickling is a fundamental process for the treatment of metallic surfaces in large-scale industries, especially in ferrous alloys prone to the formation of oxides and scale. However, the variability of operational factors can compromise the efficiency, quality, and sustainability of the process. In this context, the main objective of this research is to apply a method for maximizing chemical pickling based on experimental analysis of the most relevant factors, using the Taguchi Method. An experimental study was conducted in an industrial setting, using an L₁₈ orthogonal array design that considered multiple factors (such as acid type, oxidation level, temperature, and bath composition). Tests were carried out in triplicate and analyzed using MINITAB® software, with mean response and signal-to-noise ratio (S/R) as the main metrics. Results showed that the type of oxidation (mill scale vs. storage oxidation), absence of thermal control in the baths, and acid composition had a direct impact on the pickling time. Sulfuric acid (H₂SO₄) proved efficient but raised environmental concerns, while phosphoric acid (H₃PO₄) showed limited effectiveness in removing severe oxidation. Statistical analysis enabled the identification of a “success formula” to minimize exposure time. The findings demonstrate that the implementation of statistical techniques for experimental design and analysis can effectively transform empirical processes into evidence-based operations, yielding substantial improvements in operational efficiency (such as a 30% increase in productivity in the 3rd shift) and enhanced process control, exemplified by stabilized temperature conditions.

Keywords: Chemical pickling; Process optimization; Taguchi Method; Operational efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de Funil – Combinação de Palavras Chaves	15
Figura 2 – Informação de consulta: <i>Steel + Pickling Process</i> + Taguchi	16
Figura 3 – Periódico resultado da pesquisa	16
Figura 4 – Abordagem por Mapa de Processo	25
Figura 5 – Pesquisa Experimental	36
Figura 6 – Análise de Taguchi – Média e S/R	42
Figura 7 – MANOVA – Média – Temperatura e HCl	47

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Gráfico 1 – Resposta Média do tempo de decapagem	41
Gráfico 2 – Resposta Sinal/Ruído (S/R) do tempo de decapagem	42
Gráfico 3 – Fatores Principais para a Média do tempo de Decapagem (Temperatura e HCl)	45
Gráfico 4 – Interações do tempo de decapagem dos Fatores Principais (Temperatura e HCl)	46
Gráfico 5 – Melhoria do tempo de decapagem dos Fatores Principais (Temperatura – 40°C e HCl – Alto)	47
Gráfico 6 – Melhoria do tempo de decapagem dos Fatores Principais (Temperatura – 25°C e HCl – Alto)	48
Gráfico 7 – Melhoria do tempo de decapagem dos Fatores Principais (Temperatura – 25°C e HCl – Padrão)	48

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 1 – Fatores e níveis (Experimento)	37
Tabela 2 – Fatores e Níveis – Experimento – Preparação	38
Tabela 3 – Fatores e Níveis – Experimento – Realizado	40
Tabela 4 – Matriz Ortogonal – Temperatura (3 níveis) e HCl (2 Níveis)	45
Tabela 5 – Resultado da ANOVA	49
Tabela 6 – Sumário do Modelo	49
Tabela 7 – Análise das Médias e IC	50
Quadro 1 – Resumo dos Resultados Propostos	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	OBJETIVOS:.....	14
1.2	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	14
1.3	JUSTIFICATIVA.....	17
1.4	ESTRUTURA E FLUXO DE DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA.....	17
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	19
2.1	PROCESSO DE DECAPAGEM	19
2.2	ANÁLISE DE EXPERIMENTO	24
2.2.1	<i>Definições</i>	27
2.3	PASSOS PARA A EXPERIMENTAÇÃO – PRINCIPAIS	29
2.4	TÉCNICAS MAIS UTILIZADAS	30
2.5	MÉTODO DE TAGUCHI.....	31
3	MATERIAIS E MÉTODO	36
3.1	PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO	37
4	RESULTADOS	40
4.1	VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS	44
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E DISCUSSÃO	51
6	CONCLUSÃO	52
	REFERÊNCIAS.....	54
	DADOS CURRICULARES.....	58

1 INTRODUÇÃO

Em um ambiente marcado por rápidas transformações e crescente competitividade, torna-se essencial incorporar tecnologias inovadoras e metodologias eficientes com o propósito de reduzir perdas e melhorar os resultados. Para que essas metas sejam alcançadas, é crucial compreender em profundidade os processos operacionais, o que possibilita decisões bem fundamentadas, sustentadas por dados concretos, promovendo ações eficazes e sustentáveis a longo prazo (Box *et al.*, 2005; Montgomery, 2012).

É comum a crença de que a análise de dados — independentemente da forma como foram coletados — conduzirá inevitavelmente a resultados satisfatórios. Quando surgem obstáculos, há a suposição de que a simples consulta a um especialista na área será suficiente para solucionar qualquer impasse (Neto *et al.*, 2010; Langley *et al.*, 2009).

Diversos processos industriais realizados sob altas temperaturas acabam formando uma camada superficial de óxidos metálicos. Existem diferentes técnicas para remover essas incrustações, como o polimento manual, o jateamento abrasivo, o jateamento com areia e o uso de agentes químicos ou ácidos. Dentre essas alternativas, a decapagem ácida ou química é amplamente empregada em plantas industriais de grande porte, especialmente no tratamento de superfícies de ligas ferrosas, devido à sua eficiência, adaptabilidade e capacidade de lidar com peças de geometrias complexas. Tal processo é voltado para a remoção de contaminantes ou camadas indesejadas — como ferrugem ou escamas — que se formam ao longo das etapas industriais. (El-Tabei *et al.*, 2021).

Além disso, o estudo conduzido por Cui *et al.* (2023) apresentam uma análise baseada no Método dos Elementos Finitos, investigando o impacto da intensidade de agitação em banhos ácidos aplicados ao processo contínuo de decapagem de bobinas laminadas a quente.

Por sua vez, Yaro *et al.* (2024) relatam a melhoria de um processo de decapagem química com o uso de ácido fosfórico (H_3PO_4), empregando o método de Taguchi — abordagem também utilizada neste trabalho. No entanto, o foco do estudo não está na melhoria da eficiência da decapagem em si, mas sim na aplicação de inibidores com o objetivo de retardar a oxidação subsequente, analisando-se os efeitos de diferentes temperaturas e concentrações de inibidor.

Já Boukhedena e Deghboudj (2021) exploram a aplicação de um inibidor orgânico sintetizado em meio ácido à base de HCl. Nesse caso, o destaque do estudo recai sobre a comparação entre os resultados experimentais obtidos e os valores previstos por modelos matemáticos, considerando como variáveis principais a temperatura e a concentração do inibidor.

1.1 OBJETIVOS:

O objetivo principal desta pesquisa consiste em identificar os fatores que exercem influência significativa sobre o tempo de decapagem química e, a partir disso, propor melhorias ao processo. Busca-se estabelecer parâmetros operacionais para a decapagem química mediante a avaliação sistemática da influência de diferentes variáveis, tais como ocorrência de oxidação, tipos e concentrações de ácidos e temperatura de operação. A melhoria da qualidade do processo de decapagem e o aumento do tempo de exposição das peças sem ocorrência de oxidação, no que se refere aos aspectos técnicos envolvidos, poderão igualmente constituir objetos de análise, conforme os resultados alcançados. Ademais, pretende-se verificar a viabilidade de incremento da produtividade do processo.

Os objetivos específicos consistem em:

- Aprofundar o entendimento e o controle sobre as variáveis do processo de decapagem química, com foco na melhoria da qualidade final e da eficiência operacional;
- Avaliar a viabilidade de incremento da produtividade com base nas relações identificadas através das análises experimentais realizadas.

1.2 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Essa pesquisa consiste na experimentação do processo de decapagem química, não levando em consideração aspectos de microestrutura do material, mas sim a qualidade de oxidação removida em um menor tempo possível, variando ácidos e temperatura.

A pesquisa foi realizada por meio de consultas em bases acadêmicas indexadas, utilizando combinações específicas de palavras-chave (Aço (*steel*), Decapagem Química (*Pickling Process*) e Taguchi).

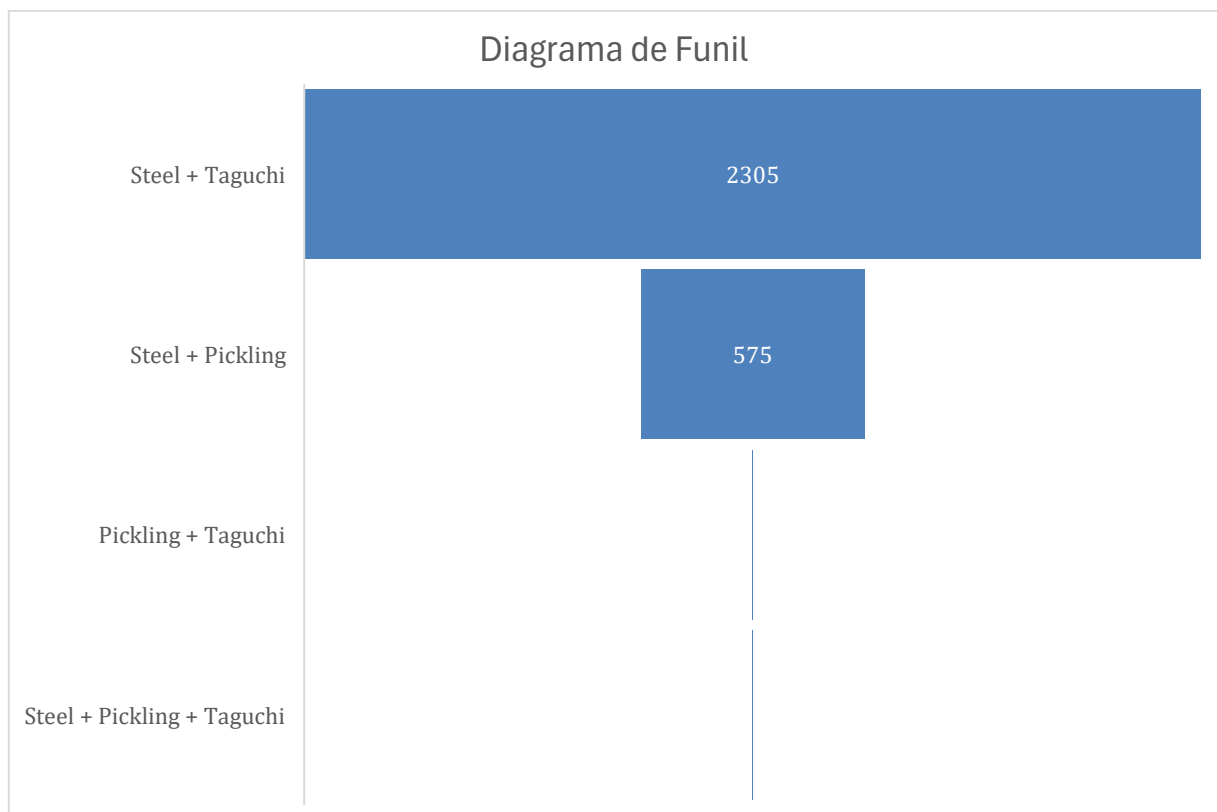
- a) *Steel* + Taguchi, temos 2.305 resultados – A alta ocorrência ampla aplicação de métodos estatísticos de melhoria (como Taguchi) em

processos envolvendo aço, especialmente em controle de qualidade e engenharia de materiais.

- b) *Steel + Pickling Process*, temos 575 resultados – observa-se um interesse moderado na investigação de processos de decapagem em aço, com foco em corrosão, preparação de superfície e tratamento químico.
- c) *Pickling Process + Taguchi*, temos 2 resultados – sugerem que há pouca exploração da aplicação de métodos Taguchi na melhoria do processo de decapagem, representando uma lacuna relevante.
- d) *Steel + Pickling Process + Taguchi*, temos 1 resultado – O único resultado encontrado demonstra que pesquisas integrando os três temas são extremamente raras, o que pode indicar uma oportunidade promissora para estudos interdisciplinares.

Os resultados foram organizados em um diagrama de Funil, representado por meio da Figura 1, para facilitar a visualização das interseções entre os temas:

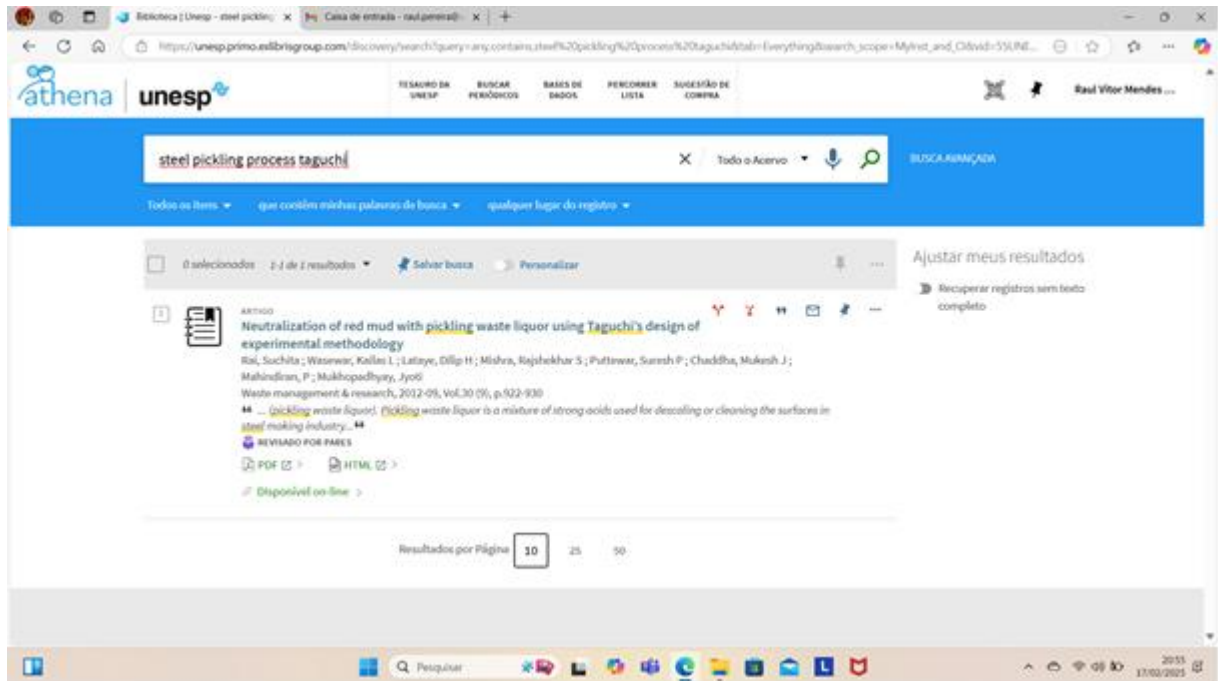
Figura 1 – Diagrama de Funil – Combinação de Palavras Chaves



Fonte: Autor

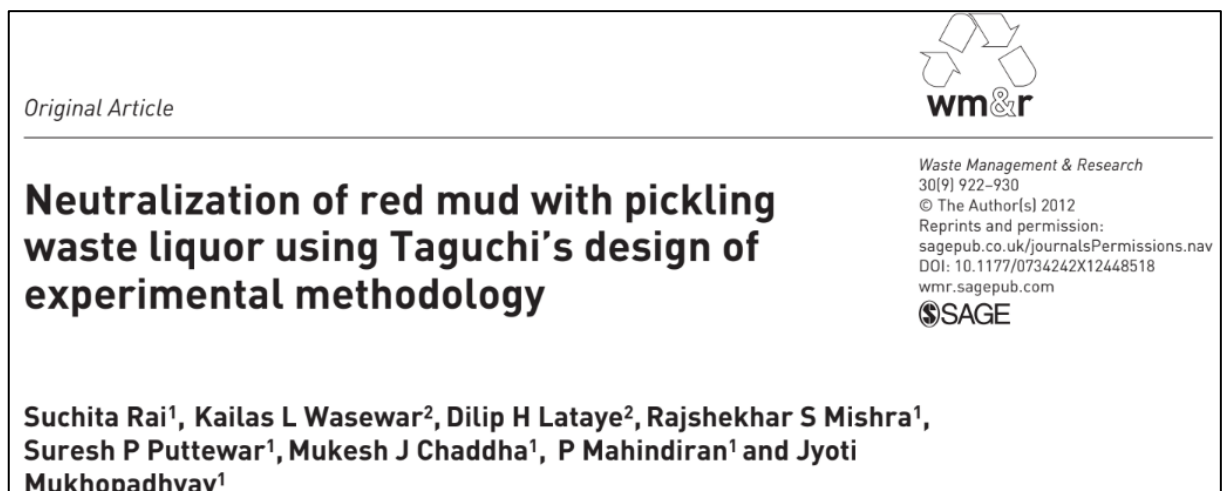
É possível observar por meio da Figura 2, a conclusão da pesquisa realizada. Por meio da Figura 3, verifica-se a evidência do periódico registrado com as 3 palavras chaves:

Figura 2 – Informação de consulta: *Steel + Pickling Process + Taguchi*



Fonte: Universidade Estadual Paulista

Figura 3 – Periódico resultado da pesquisa



Fonte: *Waste Management & Research*

A análise revela que, embora os temas *Steel* e Taguchi sejam amplamente explorados separadamente, há uma baixa integração com o processo de decapagem (*Pickling Process*). A interseção entre os três termos é praticamente inexistente, sugerindo uma área de pesquisa pouco explorada com potencial para inovação, especialmente na melhoria de processos químicos aplicados ao aço.

Com o exposto anteriormente, percebe-se que este trabalho está bem na fronteira do conhecimento. Podendo contribuir para o conhecimento na academia, bem como para a sociedade, pois Rai, *et al.* (2012) apesar de tratarem o tema de decapagem química, aço, utilizando o Método de Taguchi, trabalham e propõem o estudo com a neutralização do resíduo de bauxita gerado em uma refinaria de Alumina (não aço) juntamente com o resíduo ácido gerado pelo processo de decapagem química criando um composto com menor agressividade ao meio ambiente. Não se encontram trabalhos ou estudos referentes a esse processo de decapagem química em aço utilizando o Método de Taguchi.

1.3 JUSTIFICATIVA

A disseminação da técnica de Projeto e Análise de Experimentos na indústria em questão oferece um potencial significativo para a expansão em empresas de menor porte, conforme destacam Yaro *et al.* (2024) e Rai *et al.* (2012), que muitas vezes não possuem o mesmo corpo técnico especializado das grandes corporações (pois é possível um maior conhecimento do processo, bem como posteriores melhorias em dispersões). Além de contribuir para a melhoria de processos e tomada de decisões nessas empresas, a aplicação dessa metodologia pode fortalecer a competitividade, promover a inovação e expandir o conhecimento técnico, permitindo que pequenas empresas alcancem melhores resultados e um crescimento sustentável no mercado.

1.4 ESTRUTURA E FLUXO DE DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Conforme as metodologias mostram, este trabalho será apresentado da seguinte forma:

- No primeiro capítulo, apresentou-se a introdução do trabalho, bem como os objetivos principais e específicos. Além disso, foram abordadas a delimitação da pesquisa e suas contribuições e a justificativa para esse trabalho, incluindo a organização do texto.

- O segundo capítulo procura-se apresentar de forma simplificada os processos de decapagem, buscando definir o processo em si, aplicações e as variáveis principais e secundárias que influenciam o processo. Além disso, pretende-se abordar as principais técnicas do projeto e análise de experimentos, no que diz respeito às principais aplicações, limitações, vantagens e desvantagens. Devido a um grande número de trabalhos já publicados, onde há uma explicação matemática mais profunda da técnica, não foi dada ênfase na dedução de fórmulas e teorias, mas sim na aplicação propriamente dita da técnica, objetivando uma maior contribuição científica.
- No capítulo 3, descreve a pesquisa experimental ou experimentação, mostrando o processo e as variáveis a serem verificadas, além de definir a técnica do Projeto e Análise de Experimento utilizada, justificando o porquê desta utilização dentre as diversas técnicas existentes.
- No capítulo 4, apresentam-se as discussões sobre os resultados obtidos e toda a análise sobre eles.
- Considerações finais e discussão finais são apresentadas no capítulo 5.
- As conclusões finais e recomendações são apresentadas no capítulo 6.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 PROCESSO DE DECAPAGEM

De acordo com Crisan e Vermesan (2024), a corrosão é um fenômeno universal indesejável que afeta diversos setores industriais, incluindo as indústrias petrolífera, química e metalúrgica. Por exemplo, considerando as perdas diretas e indiretas, bem como as medidas preventivas e de proteção, EL-Kiri *et al.* (2024) estimaram que o custo das perdas causadas pela corrosão em um determinado país varia de 1% a 5% do Produto Interno Bruto (PIB).

Hsissou *et al.* (2024) informam que o aço e suas ligas estão entre os materiais preferidos na engenharia industrial devido às suas excelentes propriedades elétricas, térmicas e mecânicas, além do baixo custo. Apesar dessas vantagens, o aço continua sendo muito sensível a ambientes úmidos e agressivos que alteram suas características físico-químicas. Para remover ferrugem, impurezas e incrustações indesejadas durante os processos industriais, o aço é submetido a tratamentos em banhos de decapagem, limpeza e desincrustação, bem como durante a estimulação de poços de petróleo e gás por meio de soluções agressivas de natureza ácida, como ácido clorídrico e ácido sulfúrico. Esses ácidos provocam a dissolução do aço por meio de reações químicas ou eletroquímicas.

Ainda assim, Verma *et al.* (2020), afirmam que devido aos efeitos graves da corrosão, diferentes técnicas têm sido adotadas para interromper ou, ao menos, reduzir esse fenômeno. No entanto, um dos métodos mais eficazes é intervir no meio corrosivo por meio da adição de inibidores de corrosão.

De acordo com Gentil (2022), a causa básica da oxidação é conhecida. Os metais apresentam uma condição termodinâmica instável e tendem a mudar para uma condição estável pela formação de óxidos, hidróxidos, sais etc. Desta maneira a corrosão é um processo natural e indesejável. Para combater, ou melhor, atenuar essa tendência termodinâmica dos metais, dispõe-se de vários métodos. A maioria destes métodos de controle da corrosão consiste em intercalar uma camada protetora entre o metal e o meio corrosivo. Essas camadas protetoras são de formação natural e/ou artificial.

Além da decapagem química, um outro processo muito utilizado na remoção de óxidos é o da decapagem mecânica. Apesar de não haver muitos artigos tratando sobre esse processo, Jamaluddin *et al.* (2016) analisam o efeito da variação

da velocidade de jateamento e da mesa em uma decapadora mecânica fechada, buscando como variável resposta a melhoria da rugosidade.

Khoddami *et al.* (2023), propõem um estudo sobre microjateamento. Este é um processo geral para o tratamento de superfície de componentes de engenharia, como engrenagens, implantes dentários e parafusos. Esses componentes são colocados sob impactos de partículas sólidas. Para atingir a superfície final aceitável, é importante apresentar uma previsão precisa e rápida da taxa de erosão e outros mecanismos de danos superficiais sob várias condições.

Ainda, de acordo com Gentil (2022), quando analisado o tipo de decapagem química temos a possibilidade de:

- Decapagem Alcalina: Consiste na ação de certas bases (NaOH, KOH, etc.) sob metais chamados leves ou macios (alumínio, zinco, etc.). É bastante conhecida como no caso do fosqueamento do alumínio por soluções cáusticas. Seu emprego é discutido e não muito aconselhável para a decapagem de aços, visto que se demanda um tempo maior para realizar o mesmo efeito da decapagem ácida. As temperaturas são bem mais elevadas e a incapacidade de atuar sob diversos óxidos, como os formados na laminação a quente podem se tornar barreiras para esse processo. Freire *et al.* (2009), abordam o estudo de filmes passivos formados em aço carbono em meios alcalinos pela aplicação de potenciais anódicos. O trabalho busca o entendimento da formação de camadas finas de óxido de ferro em substratos de aço médio carbono, em meios alcalinos pela aplicação de diferentes potenciais anódicos a fim de caracterizar sua morfologia, composição e comportamento eletroquímico, em particular sob condições de proteção catódica. Como resposta revela a importância do potencial do eletrodo na formação dos filmes passivos em aço-carbono em meios alcalinos. A estrutura do filme passivo é dependente do potencial e afeta a eficiência da corrente de proteção catódica.
- Decapagem Ácida: Este processo visa à imersão em banhos ácidos da superfície metálica para a retirada das camadas de carepa, óxidos, e outros compostos. Deve-se ressaltar que a adição de inibidores de oxidação no banho ácido é necessária devido à alta ativação da

superfície, provocada por este processo principalmente logo após o banho e em contato com o ar.

O processo de decapagem ácida, pode gerar um efeito conhecido como fragilização por hidrogênio. Silva *et al.* (2022), apresentam um estudo sobre essa fragilização e mostra que a fragilização por hidrogênio pode ocorrer quando o hidrogênio atômico é absorvido pelo aço durante o processo de limpeza ácida. Na literatura, estudos de inibição de corrosão por compostos orgânicos em soluções ácidas não têm dado atenção, em sua grande maioria, à inibição da permeação de hidrogênio no aço.

Em estudo similar, Zhen *et al.* (2025) investigam o papel da decapagem ácida inadequada na fissuração por corrosão sob tensão (CST) de trocadores de calor tipo U em aço inoxidável S31603. Por meio da análise de falha de um trocador de calor com vazamento, constatou-se que a decapagem ácida excessiva durante a fabricação induziu sulcos de corrosão intergranular, os quais atuaram como pontos de iniciação para a CST.

Apesar de não ser o foco dessa experimentação, o uso de inibidores de corrosão é amplamente utilizado em processos de decapagem química. Naveen *et al.* (2016), buscam uma tentativa de investigar a influência de alguns inibidores orgânicos com várias concentrações no comportamento de corrosão por decapagem ácida do aço C45 sinterizado e densificado e 2% de adição de cobre ao aço C45 com condições sinterizadas e densificadas. Para esse processo, foram utilizados inibidores de corrosão orgânicos Tioureia, Glicina e Benzoato de Sódio.

El-Kiri *et al.* (2024), propõem a comparação de teoria e prática para uma nova resina epóxi como inibidor de corrosão em aço carbono. O aumento da temperatura levou a uma leve diminuição na eficácia inibitória do aço carbono em meio de 1M HCl na presença de 10^{-3} M de OER (2,3,5,6-tetraglicidiloxi-4-(3,4,5-triglicidiloxi)-6-(glicidiloximetil)tetraidro-2H-piran-2-iloxi-hexanal).

Outrossim, Barrahi *et al.* (2025), estudam a capacidade redutora do inibidor TMPI ((4 R,5S)-2,4,5-tris(4-metoxifenil)-4,5-diidro-1H-imidazol), na corrosão de aço carbono, avaliado em diferentes concentrações e temperaturas, sendo constatado que a eficiência de inibição aumentou com o aumento da concentração, mas diminuiu com o aumento da temperatura, atingindo um pico superior a 96,2%.

Também, Ramesh & Holze (2000), propõem um estudo da inibição da corrosão e permeação de hidrogênio para aço-carbono em HCl por isômeros de

compostos orgânicos. Já Siva *et al.* (2021), apresentam o estudo dos efeitos dos inibidores orgânicos do 2-(nitrometileno) oxazolidina (OXA) e do 2-(nitrometileno) imidazolidina (IMD) como inibidores da corrosão do aço SAE 1020 em solução aquosa de HCl 0,1 mol L⁻¹. Chaouche, *et al.* (2024), buscam de forma mais simples, o uso de óleos na inibição de corrosão para aço carbono melhorando a eficiência em 90,3% em sua análise.

Silva *et al.* (2022), trazem um estudo mostrando que a fragilização por hidrogênio pode ocorrer quando átomos de hidrogênio são absorvidos pelo aço durante a limpeza ácida. Estudos sobre inibidores de corrosão orgânicos em soluções ácidas geralmente não consideram a inibição da permeação de hidrogênio no aço. Este trabalho mostra que a melhor inibição da corrosão nem sempre significa melhor inibição da permeação de hidrogênio. Pela primeira vez, compostos à base de imidazol foram estudados como inibidores de permeação de hidrogênio durante o decapamento de aço carbono em HCl concentrado (5,4 mol L⁻¹). A imersão do aço em soluções com inibidores específicos resultou em baixa eficiência contra corrosão (~18%), mas alta eficiência contra permeação de hidrogênio (59%). Já a adição de outros agentes ao HCl proporcionou eficiências de inibição de corrosão de 46,7% e 24,4%, respectivamente, porém sem efeito na permeação de hidrogênio.

Também, Radionova *et al.* (2022), desenvolver um modelo matemático para calcular a variação da temperatura média do fio durante o processo de trefilação múltipla em máquinas de alta velocidade. Os cálculos indicaram que, a velocidades de até 45 m/s, a temperatura média do fio pode atingir 400 °C. O aquecimento por deformação não ultrapassa 60 °C, enquanto o aquecimento por atrito pode chegar a 300 °C, dependendo do coeficiente de atrito (0,05–0,15). As taxas médias de deformação atingem 7000 s⁻¹. Constatou-se que não há condições para envelhecimento por deformação dinâmica devido a átomos de carbono, nitrogênio e oxigênio. Porém, nas condições de temperatura e velocidade da trefilação rápida, há risco de envelhecimento dinâmico na presença de hidrogênio. Portanto, durante tratamentos térmicos e decapagem, deve-se evitar a hidrogenação do aço. Além disso, para prevenir envelhecimento estático durante a trefilação, é necessário impedir que o fio aqueça acima de 180–200 °C.

Já Zhou *et al.* (2024), avalia a resistência à corrosão por pite na zona fundida de juntas soldadas de aço inoxidável austenítico com alta densidade de inclusões, antes e após tratamentos de superfície por pulso potencioestático (PPT) e

decapagem. Testes eletroquímicos e análises por SEM/EDS e EBSD mostraram que inclusões ricas em enxofre atuam como pontos de iniciação de pites, reduzindo a resistência à corrosão. Ambos os tratamentos removem essas inclusões, porém o PPT causa dissolução localizada da matriz ao redor delas, gerando pites mais profundos e favorecendo sua evolução para pites estáveis, enquanto a decapagem química não apresenta esse efeito. Concluindo que o PPT não melhora a resistência ao *pitting* em aços com alta densidade de inclusões.

Grima-Carmena *et al.* (2025), analisa estatisticamente, por ANOVA, a lixiviação eletroquímica de placas de circuito impresso (WPCBs), avaliando os efeitos do pré-tratamento químico e das concentrações de Fe^{2+} e Cl^- na recuperação de Cu, Ag e Au sob condições brandas. Utilizando um sistema desenvolvido internamente, operando à temperatura ambiente em meio levemente ácido (0,05 M H_2SO_4), foram obtidas eficiências de lixiviação de até 99% para Cu e Ag e 75% para Au, em menos de 150 minutos para Cu e Ag e 60 minutos para Au. Com base nos resultados, foi proposto um processo sequencial, escalável e ambientalmente amigável para reciclagem verde, que permite valorizar ácidos de decapagem usados, recuperando separadamente metais base e preciosos das placas de circuito impressos.

De forma a simplificar, Wu *et al.* (2024), apresenta um método simples e ecológico para produzir carbono ativado a partir da carbonização de glicose utilizando nitrato de potássio como agente de ignição, gerando carbono leve que, após calcinação e decapagem química, torna-se adequado para supercapacitores. A técnica dispensa o uso de álcalis fortes, como KOH, e mostrou que a proporção ideal de nitrato de potássio é 50% na mistura inicial. O carbono ativado obtido apresenta excelentes características físicas e foi usado na montagem de supercapacitores com eletrólito orgânico, alcançando desempenho superior: curva CV quase retangular, comportamento estável em carga-descarga mesmo a 5 A/g e capacidades específicas de 38,41 F/g (capacitor) e 153,66 F/g (eletrodo).

Contudo, Silvério *et al.* (2025), aborda a síntese de N-heterociclos solúveis em água de baixo custo como inibidores de corrosão e fragilização por hidrogênio para aço carbono SAE 1020 durante decapagem ácida em HCl 1,0 mol L^{-1} . Foram avaliados os compostos 2-(nitrometileno)-1,3-oxazinano (NOX) e 2-(nitrometileno)hexahidropirimidina (NHE), que apresentaram eficiências de até 91,5% (NOX) e 82,7% (NHE) na faixa de 3,7–4,0 mmol L^{-1} , sendo que NOX também inibiu a permeação de hidrogênio em 42,8%. Observou-se comportamento anômalo do NOX

em concentrações elevadas, associado à dissociação de um átomo de oxigênio e sua ligação à superfície de ferro, fenômeno confirmado por cálculos de DFT, que indicaram NOX como energeticamente mais favorável e com menor energia de ligação que NHE. Esses resultados demonstram o potencial dos N-heterociclos como inibidores eficientes, não tóxicos e de fácil síntese para aplicações industriais, contribuindo para reduzir corrosão, consumo de ácido e fragilização por hidrogênio em processos de decapagem.

2.2 ANÁLISE DE EXPERIMENTO

A técnica do Projeto e Análise de Experimentos não é uma técnica nova. Algumas aplicações datam mesmo das primeiras décadas do século, com os trabalhos pioneiros de Fisher e Student (citado por Neto *et al.*, 2010). De acordo com Montgomery (2012), Fisher foi o inovador da utilização de métodos estatísticos no projeto experimental, mas há outras significantes contribuições de Yates, Bose, Kempthorne, Cochran e Box. Basicamente, a experimentação tem como abordagem principal a quantitativa.

Apesar de ter suas primeiras publicações na década de 30 e de ser ainda pouco conhecida, vem despertando um grande interesse no meio acadêmico e produtivo, após as ideias apresentadas pelo Dr. Genichi Taguchi nos anos 80. Alguns trabalhos, como exemplo Yaro *et al.* (2024), relatam o sucesso da aplicação dessa técnica que permitiu a melhoria do processo de decapagem química utilizando ácido fosfórico (H_3PO_4), na melhor temperatura para o banho, bem como sua concentração, sendo realizados apenas 16 testes (tratamentos – L_{16}) contra os mais de 2000 que seriam necessários, caso a técnica não fosse aplicada. Em aplicações na área industrial, destacamos Box e Hunter (2005). Observam-se ainda muitos trabalhos que se referem a aplicações na indústria ou não.

Muitas indústrias têm se utilizado desta técnica na resolução de seus problemas, conforme destacam Yaro *et al.* (2024) e Rai *et al.* (2012), pois é possível um maior conhecimento do processo, bem como posteriores melhorias em dispersões.

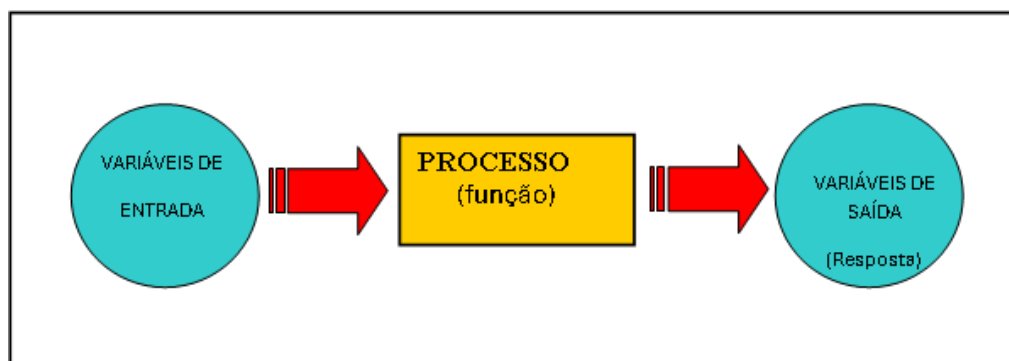
Moura *et al.* (2024), apresentam um fatorial completo com dois níveis, três variáveis de controle e replicado três vezes para encontrar o tempo mais rápido no processo de montagem de uma *mockup* escala 1:18. Com uma abordagem

neuroergonômica, os fatores gênero, postura de trabalho e mão dominante foram claramente descritos e combinados.

Um dos problemas mais comuns que um experimentador pode enfrentar é a determinação da influência de uma ou mais variáveis sobre outra variável de interesse (Box e Hunter, 2005). No jargão estatístico diz-se que há o interesse de descobrir como a resposta é influenciada por fatores chamados de entrada.

Conforme Box e Hunter (2005), isto mostra que as variáveis de entrada, atuando sobre um sistema em estudo, influencia nas respostas (variáveis de saída). O sistema (processo) é considerado como uma função (desconhecida, em princípio, senão não precisaria de um experimento) que atua sobre as variáveis de entrada (fatores) e produz como saída as respostas observadas, que pode ser demonstrado esquematicamente na Figura 4:

Figura 4 – Abordagem por Mapa de Processo



Fonte: adaptado de Box e Hunter, 2005.

Como mostrado por Montgomery (2012), no setor industrial, geralmente se objetiva extrair o máximo de informações a respeito da influência dos fatores de entrada, que são as variáveis controladas do processo, sobre os fatores de saída (respostas) ou variáveis de interesse, com o menor número possível de observações, visando um menor custo e maior rapidez. Dentro da indústria, em especial no desenvolvimento de produto, muitas vezes é necessário obter informações sobre produtos e processos empiricamente. Neste momento o trabalho das pessoas envolvidas com o problema assemelha-se ao de pesquisadores ou cientistas que precisam projetar experimentos, coletar dados e analisá-los.

Ainda por Montgomery (2012) experimentos são empregados para resolver problemas de fabricação, decidir entre diferentes processos de manufatura, diferentes

conceitos de produto, entender a influência de determinados fatores etc. Além disso, esta tarefa torna-se cada vez mais importante na medida que se intensifica a base tecnológica dos produtos e as exigências governamentais e de clientes aumentando a necessidade de emprego de experimentos durante todas as etapas do ciclo de vida do produto.

Somando a isso, Box & Hunter (2005) e Montgomery (2012) discorrem que o Planejamento de Experimentos (em inglês *Design of Experiments* - DOE) é uma técnica utilizada para se planejar experimentos, ou seja, para definir quais dados, em que quantidade e em que condições devem ser coletados durante um determinado experimento, buscando, basicamente, satisfazer dois grandes objetivos: a maior precisão estatística possível na resposta e o menor custo. É, portanto, uma técnica de extrema importância para a indústria pois seu emprego permite resultados mais confiáveis economizando dinheiro e tempo, parâmetros fundamentais em tempos de concorrência acirrada. A sua aplicação no desenvolvimento de novos produtos é muito importante, onde uma maior qualidade dos resultados dos testes pode levar a um projeto com desempenho superior seja em termos de suas características funcionais como também sua robustez.

No entanto, para Neto (2010), deve-se ficar claro que esta ferramenta não substitui o conhecimento técnico do especialista da empresa sobre o assunto e nem mesmo trata-se de uma “receita de bolo” de como realizar um planejamento. O domínio do problema é de fundamental importância. O conhecimento do especialista sobre o problema conjugado com a técnica (em casos especiais somando-se ainda o auxílio de especialistas em planejamentos de experimentos) é que irá permitir bons planejamentos de experimentos, ou seja, planejamentos mais rápidos (menos pontos/variáveis), de menor custo e que possibilitem aos seus idealizadores obterem, baseado em inferência estatística, a resposta a seus problemas.

Apesar de ainda serem consideradas novas, para Neto (2010) as principais técnicas de planejamento de experimentos já existiam e potencialmente poderiam estar sendo sistematicamente aplicadas na indústria desde muitos anos. Porém, a grande maioria destas técnicas requer uma quantidade exaustiva de cálculos tornando fundamental o emprego dos recursos de informática. Um fator que tem impulsionado a aplicação industrial do planejamento de experimentos são as ferramentas computacionais de análise estatística e soluções corporativas que cada vez mais facilitam a realização das análises, manutenção e gerenciamento de dados. Neste

sentido a tendência é que tais técnicas se tornem cada vez mais próximas de aplicações práticas e, portanto, cada vez mais utilizadas.

Finalizando, Neto (2010) informa que é preciso estar claro também que, em estatística, Planejamento de Experimentos designa toda uma área de estudos que desenvolve técnicas de planejamento e análise de experimentos. Há atualmente todo um arsenal de técnicas, com vários níveis de sofisticação e uma quantidade não menor de livros sobre o assunto.

2.2.1 Definições

De acordo com Box *et al.* (2005), Neto (2010) e Montgomery, D. C. (2012) temos as definições de forma resumida na sequência:

- **Experimento:** Um conjunto planejado de operações com o objetivo de descobrir novos fatos ou confirmar ou negar resultados de investigações anteriores.
- **Fator (Variável independente):** Um “fator” é uma das variáveis controladas ou não, que exercem influência sobre a resposta que está sendo estudada no experimento. Um fator pode ser quantitativo, isto é, a temperatura em graus, o tempo em segundos, bem como pode, também, por exemplo, ser qualitativo, diferentes máquinas, diferentes operadores, interruptor ligado ou desligado, catalisador A ou B.
- **Nível:** Os “Níveis” de um fator são os valores do fator examinado no experimento. Para os fatores quantitativos, cada valor escolhido constitui um nível, isto é, se o experimento deve ser conduzido em quatro temperaturas diferentes, então o fator “temperatura” possuiu quatro “níveis”. No caso dos fatores qualitativos, “o interruptor ligado ou desligado” representa dois níveis para o fator interruptor; caso estejam sendo utilizadas seis máquinas por três operadores, então o fator “máquina” tem seis níveis, enquanto o fator “operador” tem três níveis.
- **Tratamento:** Um “Tratamento” é um nível atribuído a um fator único durante um experimento, pôr exemplo, a temperatura a 800 °C. Uma “combinação de tratamento” é o conjunto de níveis para todos os fatores num dado experimento. Por exemplo, um experimento utilizando temperatura de 800 °C, máquina 3, operador A, e interruptor desligado constituir-se-ia numa combinação de tratamento.

- **Unidades Experimentais:** As “Unidades Experimentais” consistem em objetos, materiais ou unidades aos quais se aplicam os tratamentos. Podem ser entidades biológicas, materiais naturais, produtos manufaturados etc.
- **Ambiente Experimental:** O “Ambiente Experimental” compreende as condições ambientais que podem vir a influenciar os resultados do experimento de modo conhecido ou desconhecido.
- **Bloco:** Um fator num experimento que exerce influência como fonte de variabilidade é chamado “bloco”. A palavra deriva de seu antigo uso na agricultura, na qual os blocos de terra eram as fontes de variabilidade. Um Bloco é uma porção do material experimental ou do meio experimental que apresenta uma probabilidade maior de homogeneidade em si mesma do que entre porções diferentes. Por exemplo, amostras de um único lote de material tem mais probabilidade de ser uniformes do que amostras de lotes diferentes. Um grupo de amostras de um único lote é considerado um bloco. As observações feitas num mesmo dia têm mais probabilidade de homogeneidade (variação menor) do que observações feitas pôr dias a fio. “Dias” torna-se, então, um fator de blocagem.
- **Delineamento de Experimento:** O plano formal para a condução do experimento é chamado “delineamento de experimento” ou “modelo experimental”. Ele inclui a escolha de respostas, fatores, níveis, blocos e tratamentos, além da utilização de determinadas ferramentas chamadas agrupamento planejado, aleatorização e replicação.
- **Aleatorização:** A sequência de experimentos e/ou a atribuição de amostras a diferentes combinações de tratamento de maneira puramente casual é denominada “Aleatorização”. Tal atribuição aumenta a probabilidade de que o efeito de variáveis incontrolláveis seja eliminado. Também aprimora a validade das estimativas da variância dos erros experimentais e torna possível a aplicação de testes estatístico de significância, além de construção de intervalos de confiança. Sempre que possível, a aleatorização deve fazer parte do experimento.
- **Replicação:** A “Replicação” é a repetição de uma observação ou medição de forma a aumentar a precisão ou fornecer os meios para medir a

precisão. Uma replicação única consiste em uma única observação ou realização do experimento. Proporciona uma oportunidade para que se eliminem os efeitos de fatores incontrolláveis ou de fatores desconhecidos pelo experimentador e assim, com a aleatorização, atua como ferramenta diminuidora de tendências. A replicação também ajuda a detectar erros graves nas medições. Nas replicações de grupos de experimentos, diferentes aleatorização devem ser aplicadas a cada grupo.

2.3 PASSOS PARA A EXPERIMENTAÇÃO – PRINCIPAIS

Para que um experimento tenha maiores chances de sucesso, é necessário que sejam observadas algumas importantes etapas. Montgomery (2012) descreve os principais passos:

- **Conhecimento e Exposição do Problema** – O experimentador deve ter o máximo de informações sobre o problema a ser analisado;
- **Escolha de Fatores e Níveis** – Devem ser determinados os fatores (entrada), bem como os níveis de estudo. Neste passo, soma-se conhecimento prático e teórico por parte do observador;
- **Seleção das Variáveis de Resposta** – As respostas a serem analisadas devem prover informação suficiente para resolver o problema em questão;
- **Escolha do Projeto Experimental** – Caso os passos anteriores estejam corretos, este passo é relativamente simples. Deve-se escolher o tipo de análise levando-se em consideração tempo, custo, dificuldades dos experimentos e objetivos pretendidos;
- **Realização do Experimento** – Processo de coleta de dados. Deve-se tomar cuidados para se evitar erros experimentais.
- **Análise dos Dados** – Utilização de métodos estatísticos para análise dos resultados e conclusões. Aconselha-se a utilização de softwares de apoio. Dois deles, bastante utilizados: MINITAB® e STATISTICA®; e
- **Conclusões e recomendações** – Conclusões por meio dos resultados obtidos e inferências estatísticas. Acompanhamentos e confirmações devem ser executados para validação dos resultados e conclusões.

Contudo, Box *et al.* (2005) enfocam a importância da união do conhecimento teórico e prático para os experimentadores. Além da importância na condução do experimento, ela é fundamental para a determinação dos fatores de entrada e região de interesse, bem como as seleções das respostas.

2.4 TÉCNICAS MAIS UTILIZADAS

Box *et al.* (2005), Montgomery (2012), Neto *et al.* (2010) e Taguchi *et al.* (2005) descrevem matematicamente as técnicas mais utilizadas do projeto e análise de experimentos, na qual são apresentadas principais características ligadas a cada técnica:

a) Planejamento fatorial completo 2^k :

- i. Vantagens – Permite varredura completa da região de estudo, pois utiliza todos os fatores e respectivos níveis;
- ii. Desvantagens – Não identifica variação intermediária, pois só trabalha em dois níveis, além de demandar um alto nº de corridas para problemas com grande nº de variáveis;
- iii. Aplicações – Em processos em que já se tem um prévio domínio e onde a realização das corridas não demanda alto tempo ou custo.

b) Planejamento fatorial fracionado $2^{(k-p)}$:

- i. Vantagens – Permite uma pré-análise do processo com um nº reduzido de corridas;
- ii. Desvantagens – Não permite varredura completa da região;
- iii. Aplicações – Em processos em que se deseja um pré-conhecimento e onde a literatura é limitada ou para corridas que demandam maior tempo ou custo.

c) Engenharia Robusta – Taguchi:

- i. Vantagens – Permite uma análise de um processo com muitas variáveis de entrada com um nº extremamente reduzido de experimentos;
- ii. Desvantagens – Geralmente dá uma ideia do processo, porém pode apresentar modelos matemáticos não confiáveis
- iii. Aplicações – Em processos em que há pouco ou quase nenhum conhecimento prévio de comportamento, para processos com alta dispersão ou que as corridas demandem alto custo ou tempo.

d) Metodologia da Superfície de Resposta (MSR ou RSM em inglês):

- i. Vantagens – Permite a verificação de variações intermediárias do processo;
- ii. Desvantagens – Pode apresentar erros na extrapolação dos níveis +2 e -2, pois são realizadas poucas corridas nestes níveis;
- iii. Aplicações – Melhoria de processos, principalmente bem conhecidos e com baixa dispersão.

2.5 MÉTODO DE TAGUCHI

De acordo com Rai *et al.* (2012), o Método de Taguchi, desenvolvido pelo engenheiro japonês Genichi Taguchi, é uma abordagem estatística para o controle e a melhoria da qualidade de produtos e processos. Este método se destaca por sua capacidade de otimizar o desempenho de sistemas, minimizando a variabilidade e os efeitos de fatores externos. A metodologia de Taguchi é amplamente utilizada em diversas indústrias para garantir que os produtos atendam às expectativas de qualidade dos consumidores.

Rosa *et al.* (2009), informam que a eletrodeposição de cobre em fios de titânio foi otimizada por meio de um banho ácido de sulfato, utilizando o método estatístico de Taguchi com matriz ortogonal L₁₆. Seis fatores foram avaliados em dois níveis, incluindo preparação da superfície, densidade de corrente catódica, concentrações de reagentes, carga elétrica e agitação da solução. A análise de variância indicou que a densidade de corrente catódica é o principal fator que influencia a adesão dos eletrodepósitos, enquanto os demais fatores e interações apresentaram impacto limitado. As condições ideais de eletrólise foram estabelecidas, resultando em melhoria significativa da condutividade elétrica dos fios de titânio. O estudo confirma o potencial de aplicação desses fios revestidos com cobre em componentes elétricos e reforços mecânicos para ímãs supercondutores.

Uma das principais contribuições do Método de Taguchi é o conceito de "Design Robusto". Este conceito se refere à criação de produtos e processos que são menos sensíveis a variações, tanto internas quanto externas, garantindo assim um desempenho consistente e de alta qualidade. O Design Robusto é alcançado através da identificação e controle de fatores críticos que afetam o desempenho do produto,

utilizando experimentos planejados para determinar as melhores configurações desses fatores (Rai *et al.*, 2012).

O Dr. Taguchi, desenvolveu um método baseado em experimentos de 'matriz ortogonal' que reduz significativamente a 'variância' do experimento com 'configurações ótimas' dos parâmetros de controle (Rai *et al.* 2012). Os métodos de Taguchi (Yaro *et al.* 2024) usam uma distribuição de matriz ortogonal para projetar um experimento que produz configurações experimentais menores e menos dispendiosas, com uma alta taxa de reprodutibilidade. No entanto, um dos principais problemas é a dificuldade em projetar experimentos para comparar os efeitos e interações de múltiplas variáveis. Por exemplo, um delineamento experimental tradicional para comparar quatro variáveis independentes em três níveis diferentes cada requer um grande número de experimentos individuais (ou seja, 81 experimentos). De acordo ainda, com Rai *et al.* (2012), as implicações logísticas e de recursos desse delineamento experimental tornam esses experimentos muito difíceis de realizar. Com o método de Taguchi, usando uma distribuição de matriz ortogonal para projetar um experimento, um estudo envolvendo quatro fatores em três níveis diferentes pode ser conduzido com apenas nove experimentos individuais.

No delineamento de experimentos, o Método de Taguchi utiliza matrizes ortogonais para organizar e analisar os fatores de controle e suas interações. Essas matrizes permitem a realização de um número reduzido de experimentos, mantendo a capacidade de identificar os efeitos principais e as interações entre os fatores. A matriz L_{18} , por exemplo, é uma matriz ortogonal que permite a análise de até oito fatores, sendo um com dois níveis e sete com três níveis (Yaro *et al.*, 2024).

A matriz L_{18} é frequentemente utilizada em experimentos onde se deseja avaliar múltiplos fatores com diferentes níveis de variação. Um exemplo prático do uso da matriz L_{18} é no desenvolvimento de novos materiais, onde diferentes composições e processos de fabricação são testados para determinar a combinação que resulta nas melhores propriedades mecânicas e de durabilidade. Outro exemplo é na indústria automotiva, onde a matriz L_{18} pode ser utilizada para otimizar o desempenho de motores, considerando fatores como tipo de combustível, pressão de injeção e temperatura de operação (Yaro *et al.*, 2024).

Além de sua aplicação em experimentos industriais, o Método de Taguchi também é utilizado em pesquisas acadêmicas para otimizar processos laboratoriais e experimentos científicos. Por exemplo, em estudos de biotecnologia, o uso da matriz

ortogonal, pode ser empregada para determinar as melhores condições de cultivo de microrganismos, variando fatores como temperatura, pH e concentração de nutrientes. Isso permite que os pesquisadores identifiquem rapidamente as condições ótimas para melhorar a produção de compostos de interesse (Rai *et al.*, 2012).

O Método de Taguchi é uma ferramenta poderosa para o delineamento de experimentos e a otimização de processos. Sua abordagem sistemática e eficiente permite a identificação de configurações ótimas de fatores de controle, resultando em produtos e processos de alta qualidade e desempenho consistente. A utilização de matrizes ortogonais, como a L_{18} , que será abordado neste estudo, facilita a análise de múltiplos fatores e suas interações, tornando o Método de Taguchi uma escolha diferenciada em diversas áreas da engenharia e da ciência (Yaro *et al.*, 2024).

Sahoo *et al.* (2024), tratam o impacto da temperatura de sinterização, tempo de permanência e teor de reforço na densidade e dureza do compósito usando o método de Taguchi. A significância dos parâmetros de controle foi analisada pela relação sinal-ruído e pela análise de variância. O parâmetro de controle mais influente para a densidade relativa foi a temperatura, seguida pelo teor de reforço e tempo. A combinação ideal foi alcançada a uma temperatura de sinterização de 1100 ° C, um tempo de sinterização de 20 min e 2% vol. de teor de TiB_2 .

Já Özakin (2023) trata a otimização de parâmetros de decapagem e recozimento em laminação a frio pelo método Taguchi. Os valores ótimos dos parâmetros de decapagem e recozimento na laminação a frio foram obtidos por esse método.

Dagdevir & Ozceyhan (2020) apresentam um trabalho de melhoria de parâmetros de processo em termos de estabilização e condutividade térmica na preparação de nanofluidos de TiO_2 à base de água usando o método de Taguchi e análise de relação de Grey. Dezesesseis amostras diferentes de nanofluidos com vários parâmetros de preparação foram determinadas e preparadas no âmbito do método Taguchi. A condutividade térmica e o potencial zeta das amostras são medidos sob temperatura constante de 20°C. Os níveis de contribuição dos parâmetros considerados sobre a condutividade térmica e o potencial zeta são ordenados respectivamente como a razão surfactante/partícula, o tempo de sonicação (ondas sonoras de alta frequência (ultrassom, geralmente acima de 20 kHz) para gerar cavitação acústica — a formação e implosão de microbolhas em líquidos, que libera energia suficiente para provocar efeitos físicos e químicos no meio), o poder de

sonicação e o tempo de agitação, usando análise de variância (ANOVA). Importante enfatizar que os trabalhos citados anteriormente, foram realizados com posterior confirmação de testes para garantir a confiança do método.

Singh & Ranjan (2017) utilizam um arranjo ortogonal Taguchi L_{18} para estudar as propriedades mecânicas, térmicas e metalúrgicas. Desta forma, foram estabelecidas, e o fio de filamento de melhor matéria-prima para o desenvolvimento de prótese parcial/total na Modelagem de Deposição Fundida (em inglês FDM) com propriedades de superfícies funcionalmente classificadas, onde essas foram recomendadas para aplicações futuras.

Reghuraj *et al.* (2022), apresentam um estudo do Método Taguchi e abordagem de design Box-Behnken para melhoria de parâmetros de processo de revestimento de magnetita (Fe_3O_4) desenvolvido em aço inoxidável 410 por tratamento alcalino a quente (enegrecimento de materiais). Neste estudo, o tratamento alcalino a quente é usado para escurecer o equipamento cirúrgico feito de aço inoxidável 410, que é uma nova abordagem. O efeito de variáveis de processo, como tempo de imersão, temperatura da solução salina e % em peso de dicromato de sódio na propriedade antirreflexiva do revestimento de óxido férrico ferroso (magnetita, Fe_3O_4) foi otimizado usando o método Taguchi e a metodologia de superfície de resposta. Os experimentos foram projetados usando uma matriz ortogonal de Taguchi e um design Box-Behnken. As influências dos parâmetros de revestimento na refletância percentual média foram quantificadas pela relação sinal-ruído, gráfico de efeito principal, análise de variância e gráficos bidimensionais e tridimensionais.

Tunçel (2024), estudou a melhoria da resistência ao impacto Charpy de amostras de Ácido Polilático (em inglês PLA) resistentes produzidas por impressão 3D usando o método Taguchi. Neste trabalho o autor usa o método de Taguchi com o uso posterior da ANOVA. O estudo explora o efeito dos principais parâmetros de impressão - especificamente, densidade de preenchimento, ângulo raster, altura da camada e velocidade de impressão - na resistência ao impacto Charpy. Utilizando um projeto experimental de matriz ortogonal Taguchi L_{16} , os parâmetros são variados dentro de faixas definidas. Os resultados, analisados por meio de relações sinal-ruído (S/R) e ANOVA, revelam que a densidade de preenchimento tem o impacto mais substancial na resistência ao impacto Charpy, seguida pela velocidade de impressão,

altura da camada e ângulo raster. A ANOVA identifica a densidade de preenchimento e a velocidade de impressão como os fatores mais influentes.

Shojaei *et al.* (2021), estudam a aplicação do método de Taguchi e da metodologia de superfície de resposta na remoção de corantes verde de malaquita e auramina-O por nanozeólitas de NaX em um sistema de batelada, utilizando o método de Taguchi e Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) para a remoção desse corante.

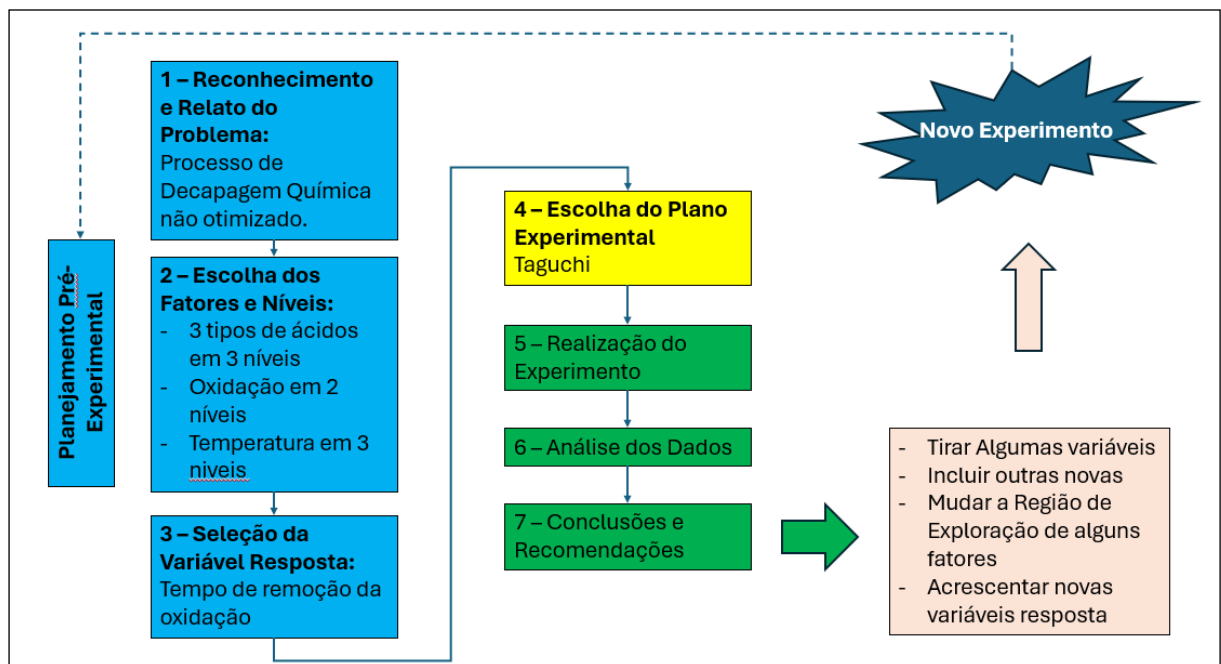
Gomes *et al.* (2023), fazem a comparação entre os métodos de modelagem dos Mínimos Quadrados (em inglês OLS - *Ordinary Least Squares*) e SR (Sinal/Ruído) na melhoria de processos com múltiplas respostas onde foram utilizados dados extraídos da literatura, provenientes de planejamentos experimentais de um processo com duas variáveis dependentes e duas independentes. Modelos foram gerados para representar cada resposta em função das variáveis independentes, utilizando as técnicas OLS e SR. Em seguida, aplicou-se o método da desejabilidade em conjunto com o algoritmo *Generalized Reduced Gradient* (GRG) para determinar os ajustes ideais do processo visando à melhoria das respostas.

3 MATERIAIS E MÉTODO

O método de pesquisa aplicado foi a experimental em uma indústria de grande porte no processo de decapagem química, pois segundo Miguel *et al.* (2018), é uma abordagem utilizada em áreas da engenharia que envolve a coleta de informações como pesquisas observacionais, mas os resultados são influenciados pelo pesquisador com intervenções. No experimento, o pesquisador delinea um experimento de forma a testar o relacionamento entre as variáveis de pesquisa operacionalizada das hipóteses. Na realidade, o pesquisador manipula as variáveis independentes, estabelecendo níveis para elas, e observa o resultado na variável dependente. Segundo Martins (1998), para demonstrar a relação de causa e efeito é fundamental a ideia de controle porque, exercendo controle sobre as variáveis, é possível experimentar alternativas e verificar o efeito sobre a variável dependente. Esse fato leva a pesquisa experimental a ter forte validade interna.

A metodologia aplicada a este trabalho é a de Análise de Experimentos com base nos Métodos de Taguchi conforme descrito pela Figura 5:

Figura 5 – Pesquisa Experimental



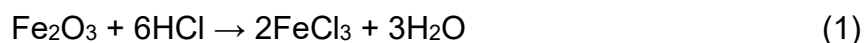
Fonte: Adaptado de Miguel et al. (2018)

O uso do método de Taguchi, escolhido para essa abordagem, deve-se à redução significativa na quantidade de experimentos, bem como o uso da Matriz L18

do Modelo de Taguchi promove, para estudo exploratório uma excelente, uma celeridade maior aos testes, sem perder a qualidade da variável resposta.

3.1 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

A decapagem de aço baixo carbono com ácido clorídrico (HCl), processo atual em questão, é um processo comum para remover óxidos e impurezas da superfície do aço. A reação química pode ser representada pela equação (1):



Neste caso, o óxido de ferro (Fe_2O_3) reage com o ácido clorídrico (HCl) para formar cloreto de ferro (FeCl_3) e água (H_2O). Lembrando que este trabalho não tem a intenção de tratar o processo em seu viés químico, mas com a forma e de análise gerencial e estatística do tema.

Para direcionar o experimento para a melhoria/diminuição do tempo de decapagem, envolvendo a equipe de produção do processo, foram definidos os fatores bem como o nível de experimento conforme apresentado no Tabela 1:

Tabela 1 – Fatores e níveis (Experimento)

Coluna Taguchi	Fator	níveis		
		1	2	3
1	A - Oxidação	Carepa	muita	-
4	B - Concentração H_2SO_4	Ausente	Padrão (handbook*)	alta
5	C - Concentração HCl	Ausente	Padrão (handbook*)	alta
7	D - Concentração H_3PO_4	Ausente	Padrão (handbook*)	alta
8	E - Temperatura °C	10°C	25°C	40°C

Fonte: Autor

* *handbook* refere-se ao ASM Metals Handbook – Corrosion

Este planejamento durou aproximadamente 2 meses até se evidenciar os fatores que possivelmente iriam apresentar um ganho significativo no processo de decapagem.

Na matriz experimental representada no Quadro 1 (Arranjo Ortogonal de Taguchi) os fatores H_2SO_4 (Ácido Sulfúrico), HCl (Ácido Clorídrico) e H_3PO_4 (Ácido Fosfórico) vão acabar se transformando em misturas desses ácidos. Foi utilizado um arranjo ortogonal L_{18} (são 18 condições experimentais) com triplicata de cada condição experimental, executada de forma aleatória, conforme apresentado no Tabela 2:

Tabela 2 – Fatores e Níveis – Experimento – Preparação

Expt No	Coluna					Rodadas Experimentais		
	1 - Oxidação	4 - H_2SO_4	5 - HCl	7 - H_3PO_4	8 - Temperatura	1	2	3
1	pouca	Ausente	Ausente	Ausente	10°C	16	5	9
2	pouca	Padrão (Handbook)	Padrão (Handbook)	Padrão (Handbook)	25°C	7	2	18
3	pouca	Alta	Alta	Alta	40°C	11	8	14
4	pouca	Ausente	Padrão (Handbook)	Alta	40°C	15	9	10
5	pouca	Padrão (Handbook)	Alta	Ausente	10°C	18	1	8
6	pouca	Alta	Ausente	Padrão (Handbook)	25°C	13	16	3
7	pouca	Padrão (Handbook)	Ausente	Padrão (Handbook)	40°C	8	17	5
8	pouca	Alta	Padrão (Handbook)	Alta	10°C	3	12	13
9	pouca	Ausente	Alta	Ausente	25°C	9	6	7
10	Muita	Alta	Alta	Padrão (Handbook)	10°C	4	13	15
11	Muita	Ausente	Ausente	Alta	25°C	14	3	2
12	Muita	Padrão (Handbook)	Padrão (Handbook)	Ausente	40°C	1	18	17
13	Muita	Padrão (Handbook)	Alta	Alta	25°C	12	11	6
14	Muita	Alta	Ausente	Ausente	40°C	10	14	16
15	Muita	Ausente	Padrão (Handbook)	Padrão (Handbook)	10°C	17	4	11
16	Muita	Alta	Padrão (Handbook)	Ausente	25°C	5	7	12
17	Muita	Ausente	Alta	Padrão (Handbook)	40°C	6	15	4
18	Muita	Padrão (Handbook)	Ausente	Alta	10°C	2	10	1

Fonte: Autor

A variável resposta para este caso está relacionada ao tempo de decapagem até a limpeza total da peça. Esta é uma análise visual. Para uma análise mais apurada, pode-se realizar uma análise de superfície via MEV, não sendo este o propósito deste trabalho, visto que a inspeção final no processo contínuo é realizada de modo visual.

Esta análise exploratória nos mostrará qual a melhor condição sobre a variável resposta (“Receita de Sucesso”) e ainda evidenciaremos a melhor condição sinal ruído para este experimento.

Um conjunto bem planejado de experimentos, no qual todos os parâmetros de interesse são variados em uma faixa especificada, é uma abordagem aprovada para obter dados sistemáticos. Matematicamente falando, tal conjunto completo de experimentos deve fornecer os resultados desejados.

No experimento realizado para melhoria no tempo de decapagem, é importante identificar fatores relevantes que afetam o processo e a maneira como eles interagem com a variável resposta. No entanto, um dos principais problemas é a dificuldade em projetar experimentos para comparar os efeitos e interações de múltiplas variáveis.

Com o método de Taguchi, usando uma distribuição de matriz ortogonal para projetar um experimento, um estudo envolvendo quatro fatores em três níveis diferentes pode ser conduzido com apenas nove experimentos individuais. O método de Taguchi consiste em três fases (Yaro *et al.*, 2024):

- 1) Projetar o experimento,
- 2) Executar e analisar; e
- 3) Confirmar e validar os resultados experimentais.

4 RESULTADOS

Após selecionar as variáveis a serem estudadas, o método de Taguchi depende da distribuição dos fatores em estudo em uma matriz ortogonal, que distribui as variáveis (fatores) de maneira equilibrada. Cada matriz pode ser identificada pela forma $L_A(B^C)$, onde o parâmetro L, designado pelo subscrito A, representa o número de experimentos que seriam conduzidos usando esse delineamento, B denota o número de níveis dentro de cada coluna, que indica quantos níveis poderiam ser investigados, enquanto a letra C indica quantos fatores ou variáveis poderiam ser incluídos no experimento. Assim, a matriz ortogonal L_{18} de Taguchi e os experimentos são realizados em triplicata sob as mesmas condições, conforme mostrado na Tabela 3:

Tabela 3 – Fatores e Níveis – Experimento – Realizado

Expt No	Coluna					Rodadas Experimentais			Tempo de Decapagem (min)			Média	desvio
	1 - Oxidação	4 - H2SO4	5 - HCl	7 - H3PO4	8 - Temperatura	1	2	3	1	2	3		
1	pouca	Ausente	Ausente	Ausente	10°C	16	5	9	-	-	-	500	100
2	pouca	Padrão (Handbook)	Padrão (Handbook)	Padrão (Handbook)	25°C	7	2	18	6,3	7,0	6,3	6,6	0,53
3	pouca	Alta	Alta	Alta	40°C	11	8	14	2,3	2,4	2,4	2,4	0,04
4	pouca	Ausente	Padrão (Handbook)	Alta	40°C	15	9	10	4,3	5,0	4,6	4,7	0,50
5	pouca	Padrão (Handbook)	Alta	Ausente	10°C	18	1	8	118,5	117,2	116,8	117,9	0,93
6	pouca	Alta	Ausente	Padrão (Handbook)	25°C	13	16	3	6,5	6,1	6,5	6,3	0,30
7	pouca	Padrão (Handbook)	Ausente	Padrão (Handbook)	40°C	8	17	5	10,5	11,5	11,2	11,0	0,69
8	pouca	Alta	Padrão (Handbook)	Alta	10°C	3	12	13	29,3	28,5	28,5	28,9	0,54
9	pouca	Ausente	Alta	Ausente	25°C	9	6	7	4,4	4,1	4,3	4,3	0,23
10	Muita	Alta	Alta	Padrão (Handbook)	10°C	4	13	15	29,3	29,4	29,4	29,4	0,09
11	Muita	Ausente	Ausente	Alta	25°C	14	3	2	35,2	28,5	29,0	30,9	3,70
12	Muita	Padrão (Handbook)	Padrão (Handbook)	Ausente	40°C	1	18	17	7,2	8,1	8,0	7,7	0,61
13	Muita	Padrão (Handbook)	Alta	Alta	25°C	12	11	6	8,5	8,2	8,2	8,4	0,22
14	Muita	Alta	Ausente	Ausente	40°C	10	14	16	13,1	14,1	13,5	13,6	0,71
15	Muita	Ausente	Padrão (Handbook)	Padrão (Handbook)	10°C	17	4	11	27,2	28,1	27,2	27,6	0,59
16	Muita	Alta	Padrão (Handbook)	Ausente	25°C	5	7	12	25,0	24,1	24,5	24,6	0,65
17	Muita	Ausente	Alta	Padrão (Handbook)	40°C	6	15	4	2,5	3,1	3,0	2,8	0,42
18	Muita	Padrão (Handbook)	Ausente	Alta	10°C	2	10	1	116,2	100,5	112,0	109,6	8,14

Fonte: Autor

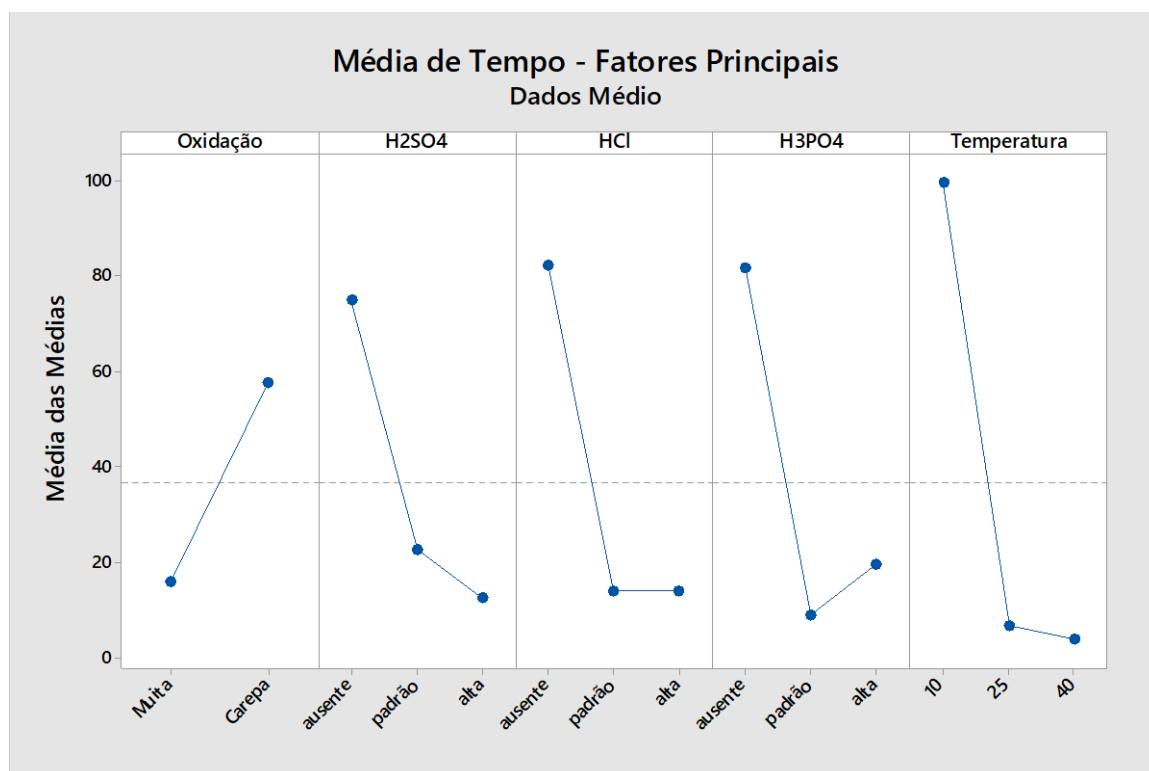
Serão discutidas, também, as limitações do estudo e possíveis direções para pesquisas futuras. É fundamental que tanto os resultados quanto a discussão sejam fundamentados em evidências sólidas e que contribuam significativamente para o avanço do conhecimento sobre o tema abordado.

Importante salientar que devido a solicitação da empresa, os dados de concentração dos ácidos, nestes primeiros experimentos, não poderão ser informados, somente o após o resultado final, se assim houver. As análises dos ácidos, serão tratadas como variáveis discretas.

A rodada de experimento 1, devido a não ter presença de ácido algum, logicamente não terá como realizar a decapagem da peça, portanto assumiu-se um tempo bem alto, de modo que estatisticamente houvesse uma extrapolação e não prejudicasse a análise e condução dos experimentos.

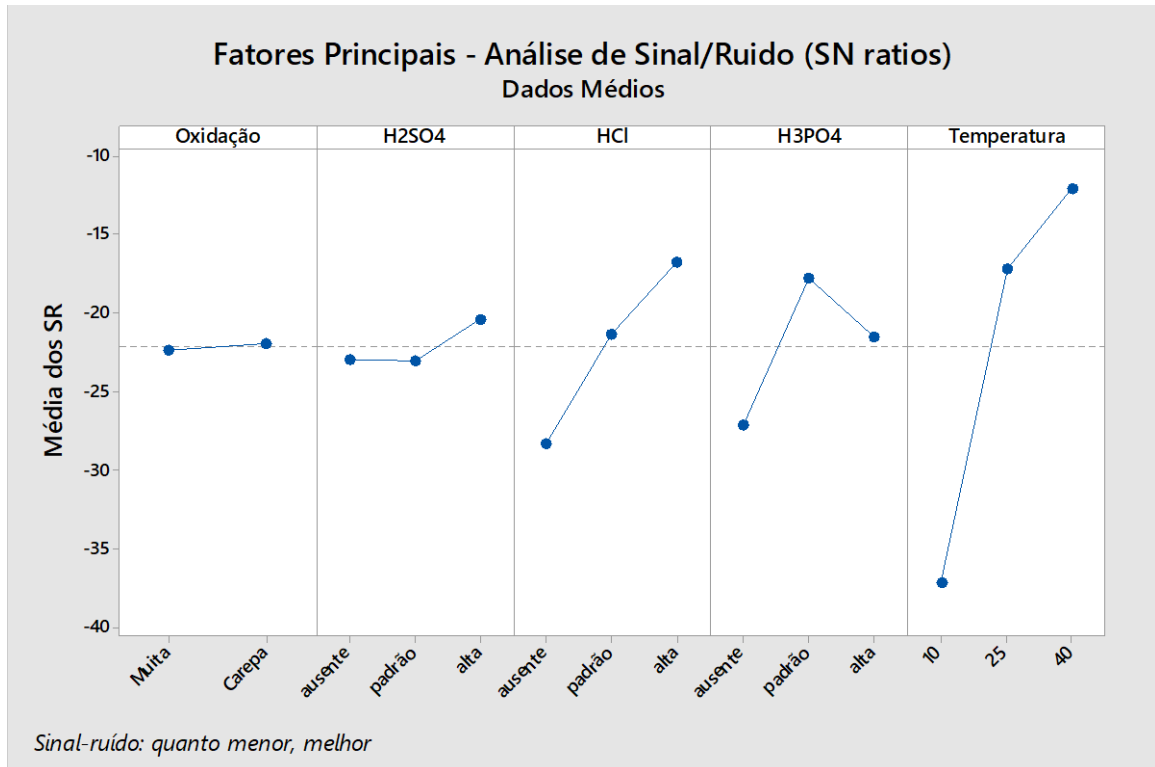
A análise foi compilada no Software MINITAB® utilizando a Análise por meio do Modelamento de Taguchi, selecionando o tipo de experimento (neste caso L_{18}) e inserindo os fatores e os níveis de cada fator. A partir da condução do experimento, os resultados de resposta média e Sinal/Ruído (S/R) são apresentados respectivamente nos Gráfico 1 e 2:

Gráfico 1 – Resposta Média do tempo de decapagem



Fonte: autor

Gráfico 2 – Resposta Sinal/Ruído (S/R) do tempo de decapagem



Fonte: autor

A análise de Taguchi da média e do Sinal/Ruído, segue conforme Figura 6:

Figura 6 – Análise de Taguchi – Média e S/R (Minitab®)

Tabela de Resposta para Razões Sinal Ruído					
Menor Melhor					
Nível	Oxidação	H2SO4	HCl	H3PO4	Temperatura
1	-22,37	-22,95	-28,33	-27,14	-37,17
2	-21,90	-23,02	-21,37	-17,78	-17,16
3		-20,44	-16,71	-21,49	-12,08
Delta	0,47	2,58	11,61	9,36	25,10
Posição	5	4	2	3	1

Tabela de Resposta para Médias					
Nível	Oxidação	H2SO4	HCl	H3PO4	Temperatura
1	15,811	75,078	82,400	81,779	99,887
2	57,774	22,644	14,039	8,962	6,771
3		12,655	13,938	19,636	3,719
Delta	41,963	62,423	68,462	72,817	96,168
Posição	5	4	3	2	1

Fonte: autor

Dessa forma, são pontos de análise a destacar:

- **Carepa e Muita Oxidação** – Primeiramente, considerando “Carepa” como a oxidação proveniente da usina e “Muita Oxidação”, a oxidação proveniente do material armazenado muito tempo no estoque aberto, temos que a condição de carepa demanda mais tempo para ser decapada do que o material já parado no estoque. Após esse estudo, estabelece-se como boa prática, já registrado em documentos internos, que todo o material deve ser armazenado ao tempo, por pelo menos 5 dias, para a geração de oxidação superficial e consequente quebra da carepa de usina, de modo a diminuir significativamente o tempo de decapagem;
- **Temperatura (e Sistema Atual)** – Atualmente, percebe-se que quando em tempo do frio (meses de Junho e Julho principalmente nas noites), há um aumento significativo do tempo de decapagem, devido aos banhos ácidos, do processo atual, não ter aquecimento presente. Nos testes, a baixa temperatura prejudica a decapagem principalmente nas bordas da peça, percebe-se a passivação/escurecimento do material, mas não a remoção da oxidação das bordas. Porém o uso do controle de temperatura (em 25°C e 40°C) suporta uma melhoria substancial no processo, sendo esse o fator mais significativo evidenciado nesse experimento. **A proposta é inserir um controle de temperatura para esse processo;**
- **HCl (Ácido Clorídrico)** – ácido hoje já em processo (em estoque) e conhecido da empresa (com todas as liberações de compra dos órgãos de fiscalização pertinentes – Polícia Civil, Exército, Polícia Federal), quando trabalhado em condições de temperatura ambiente e com um pouco de aquecimento, não se evidencia uma variação substancial no tempo de decapagem. **A proposta é analisar um pouco mais as condições desse ácido (trabalhando com a variação de temperatura e na máxima da concentração permitida);**
- **H₂SO₄ (Ácido Sulfúrico)** – em todas as rodadas onde estava presente, o aparecimento de odores era inerente desse processo, aumentando com o incremento de temperatura, gerando a preocupação dos gestores quanto à possíveis impactos indesejáveis no lavador de gases, bem como instalações e passivos trabalhistas (lembrando que uma das propostas desse trabalho também é o ESG). **A sugestão dos gestores é de não**

utilização desse ácido com base nas preocupações expostas, bem como necessidade de novas homologações juntos aos órgãos de fiscalização (Polícia Civil, Exército, CETESB entre outros);

- **H₃PO₄ (Ácido Fosfórico)** – apesar de bom decapante no início de processo, percebe-se a ineficiência deste na retirada de pontos mais incrustados de oxidação, levando um tempo maior para a remoção, ou seja, se houver um material com uma oxidação maior, o tempo de remoção será prejudicado. Como o tema principal desse trabalho é a diminuição do tempo de decapagem, não houve diferença substancial no processo com a inserção desse ácido, para a diminuição do tempo de decapagem. **Sugestão, não usar esse ácido.**

Outro aprendizado deste experimento, é que a predição de que a combinação de ácidos poderia gerar uma maior eficácia e/ou diminuição do tempo de decapagem das peças. Porém, a combinação de ácidos, gerou pouca variação ou melhoria no processo de decapagem atual.

É importante registrar, que foi evidenciado na rodada do experimento 2, a carepa se “desplacando” com maior facilidade quando usado a combinação dos 3 ácidos. Contudo, considerando que o fluxo de armazenamento e produtivo atual (deixar material armazenado ao tempo por pelo menos 5 dias, para a geração de oxidação superficial e consequente quebra da carepa de usina, de modo a diminuir significativamente o tempo de decapagem), diminui a complexidade do processo em se ter os 3 ácidos em estoque para um único processo (simplicidade de estoque e controle de processo produtivo de decapagem química).

4.1 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Com os aprendizados obtidos anteriormente, decidiu-se em verificar a condição melhorada do processo utilizando os 2 fatores de maior importância, ou seja, HCl e Temperatura. Para isso construiu-se o experimento evidenciado no Tabela 4:

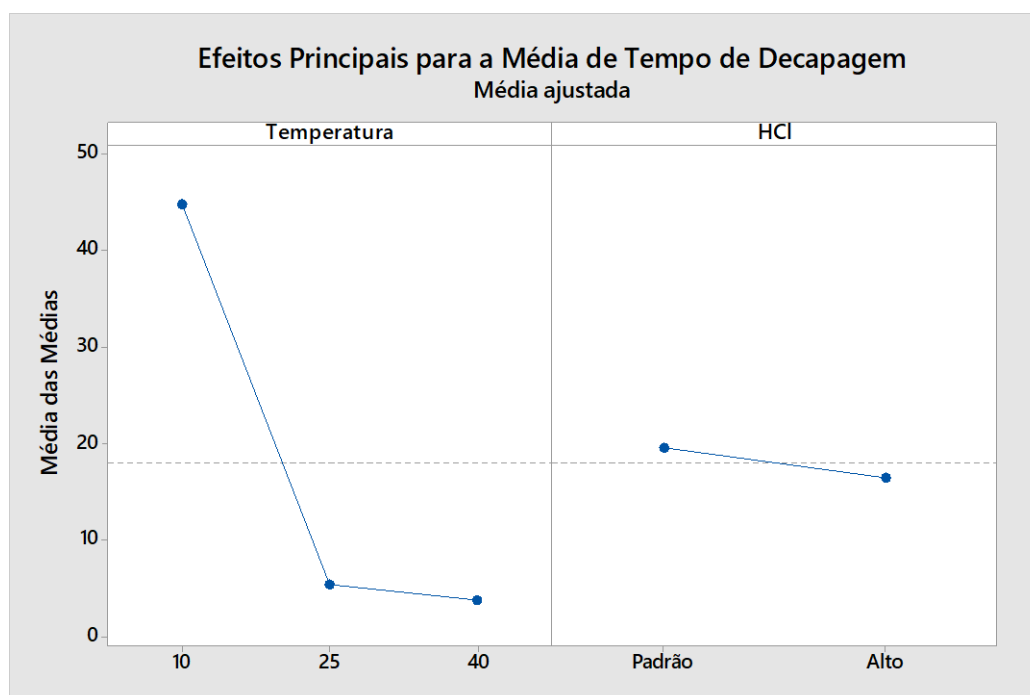
Tabela 4 – Matriz Ortogonal – Temperatura (3 níveis) e HCl (2 Níveis)

Experimento	Fator		Rodadas Experimentais			Tempo de Decapagem (min)			
	Temperatura	HCl	1	2	3	1	2	3	Média
1	25°C	Padrão	2	1	4	6,2	6,5	6,5	6,4
2	25°C	Alta	3	2	1	4,5	4,2	4,4	4,3
3	40°C	Padrão	1	4	3	4,3	4,8	4,6	4,6
4	40°C	Alta	4	3	2	3,1	3,0	3,0	3,0
5	10°C	Padrão	5	6	6	47,5	48,0	47,0	47,5
6	10°C	Alta	6	5	5	42,0	42,5	41,5	42,0

Fonte: autor

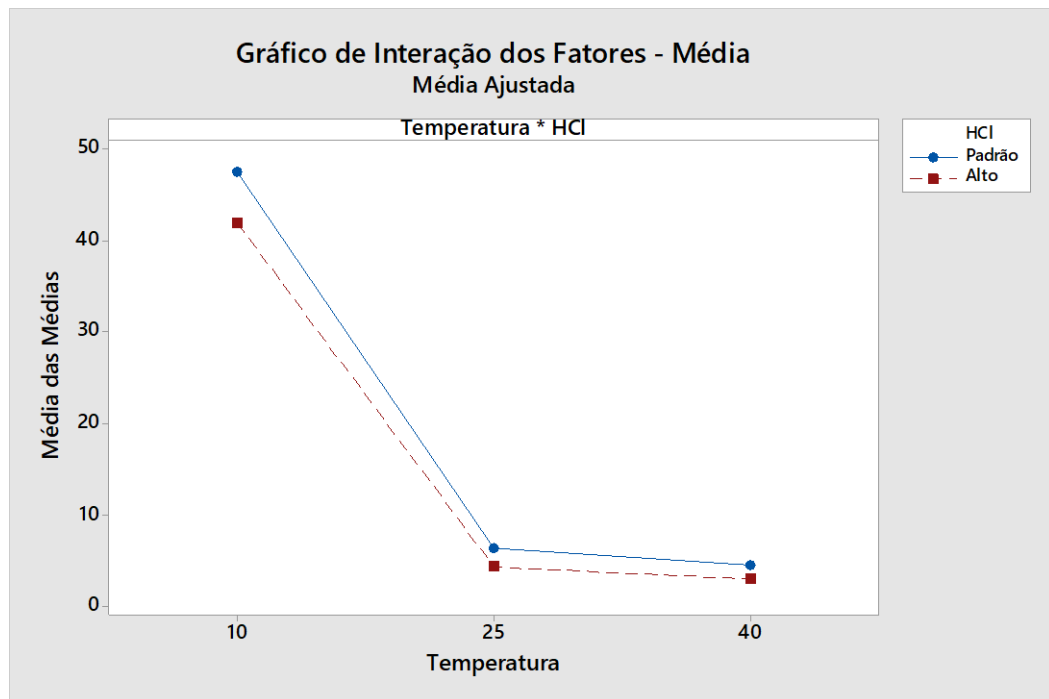
Com a utilização do Software MINITAB® foi possível gerar os Gráficos 3 e 4, onde apresentam os Efeitos Principais para a Média do Tempo de Decapagem (Gráfico 3) e o de Interação dos Fatores Principais para a Média do Tempo de Decapagem (Gráfico 4):

Gráfico 3 – Fatores Principais para a Média do tempo de Decapagem (Temperatura e HCl)



Fonte: autor

Gráfico 4 – Interações do tempo de decapagem dos Fatores Principais (Temperatura e HCl)



Fonte: autor

Baseando-se nas decisões e informações dos Gráficos 3 e 4, os resultados mostram a melhoria do processo, tanto em estabilização quanto em redução de tempo, quando se trabalha com uma temperatura mais alta. É perceptível a melhoria, quando se inseriu uma resistência no processo e acompanhou o ácido isoladamente (sem a mistura com outros na mesma composição).

Usou-se a técnica da MANOVA (análise de múltiplas variáveis dependentes ao mesmo tempo, considerando as correlações entre elas) para se entender a relevância dessas variáveis e, bem como evitar o erro do Tipo I (falso positivo) e verificou-se o fator Temperatura com alta significância (P Valor <0,05), conforme a Figura 7:

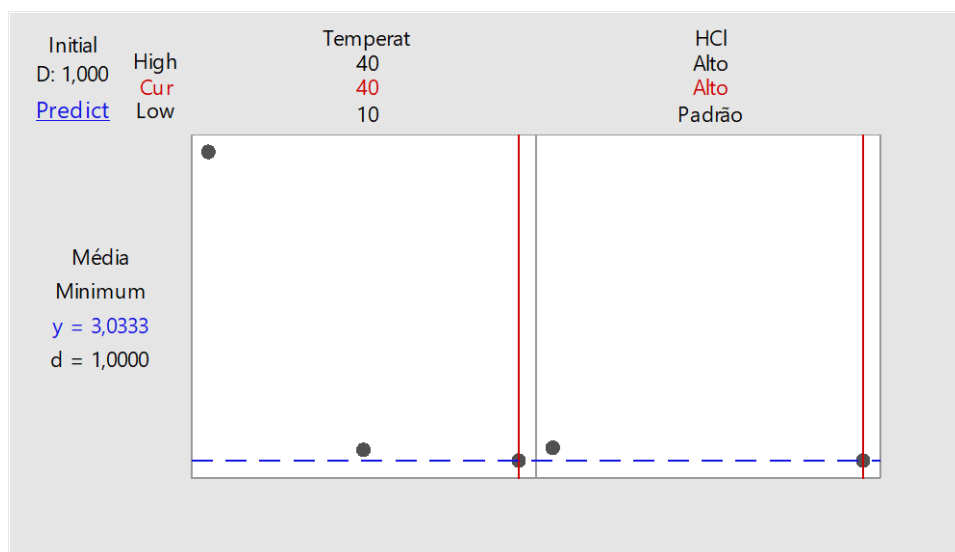
Figura 7 – MANOVA – Média – Temperatura e HCl (MINITAB®)

Modelo Linear Geral: Média versus Temperatura; HCl						
MANOVA para Temperatura						
s = 1	m = 0,0	n = 0,0				
Critério	Estatísticas de Teste	F	Núm.	GL Denom.	P	
Wilks	0,00215	463,328	2	2	0,002	
Lawley-Hotelling	463,32787	463,328	2	2	0,002	
Pillai	0,99785	463,328	2	2	0,002	
Roy	463,32787					
MANOVA para HCl						
s = 1	m = -0,5	n = 0,0				
Critério	Estatísticas de Teste	F	Núm.	GL Denom.	P	
Wilks	0,25246	5,922	1	2	0,135	
Lawley-Hotelling	2,96107	5,922	1	2	0,135	
Pillai	0,74754	5,922	1	2	0,135	
Roy	2,96107					

Fonte: autor

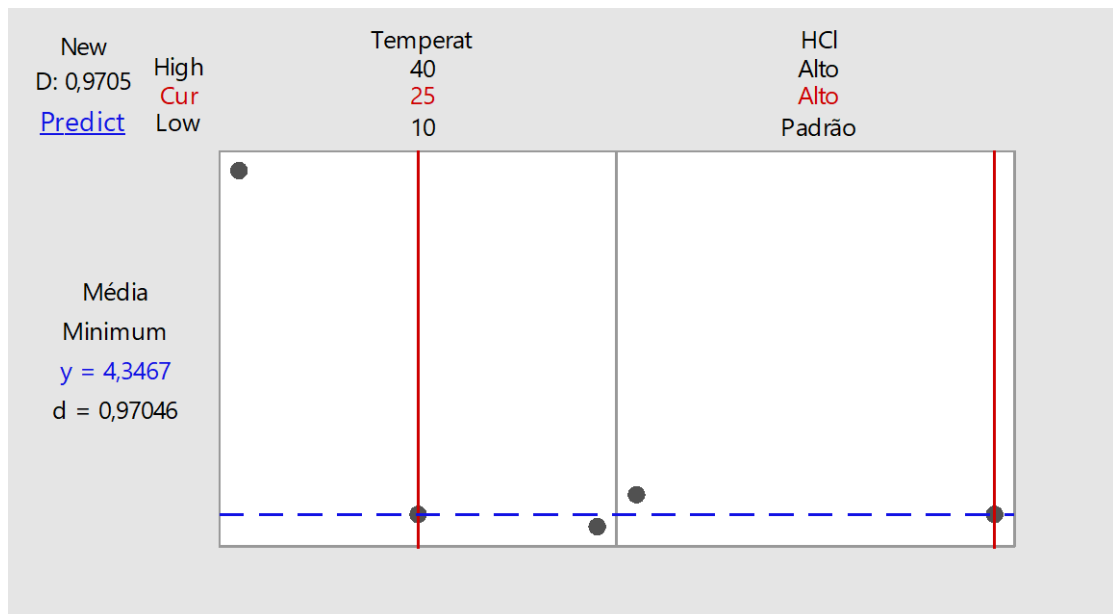
Como forma de se buscar a condição melhorada (Minimizar o tempo de Decapagem – Menor Melhor) para o processo atual, usou-se o suporte da ferramenta *Response Optimizer* do MINITAB®, conforme as possíveis condições através dos Gráficos 5, 6 e 7:

Gráfico 5 – Melhoria do tempo de decapagem dos Fatores Principais (Valor Alvo: Temperatura – 40°C e HCl – Alto)



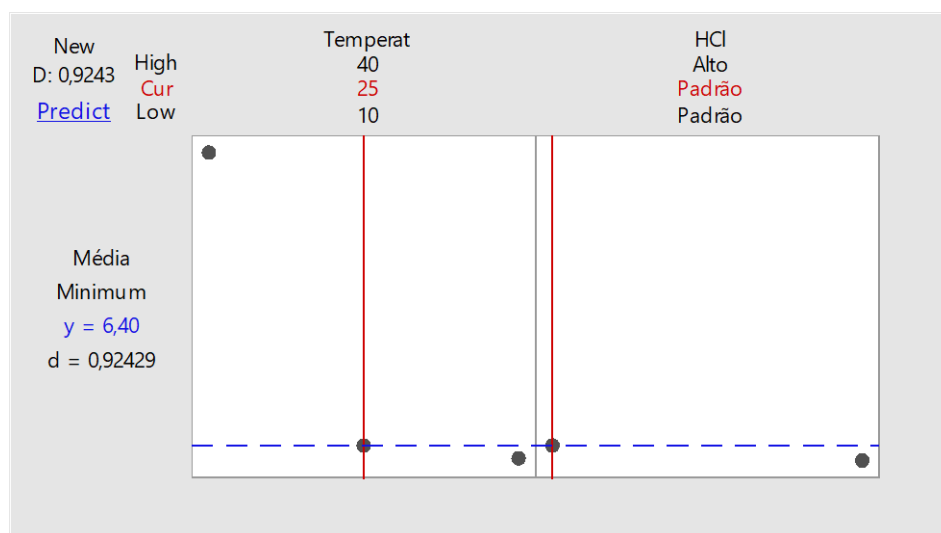
Fonte: autor

Gráfico 6 – Melhoria do tempo de decapagem dos Fatores Principais (Valor Alvo: Temperatura – 25°C e HCl – Alto)



Fonte: autor

Gráfico 7 – Melhoria do tempo de decapagem dos Fatores Principais (Valor Alvo: Temperatura – 25°C e HCl – Padrão)



Fonte: autor

Com base nos Gráficos 5, 6 e 7, onde, o valor de Desejabilidade deve estar entre 0 e 1, onde 0 é totalmente indesejável (fora dos limites aceitáveis) e 1 é totalmente desejável (atinge o objetivo perfeitamente), como a relação entre D e d está bem próxima, significa que nenhuma resposta está muito pior ou muito melhor que as outras, ou seja, o processo está equilibrado: todas as características atendem

as metas de forma semelhante. Não haveria a necessidade de uso dessa ferramenta pois ela é mais usual quando se tem múltiplas variáveis, contudo, tomou-se a decisão do uso para aumentar o conhecimento da mesma.

Com o resultado acima programou a rodada em pequena escala em processo produtivo, com a temperatura estabilizada em 25°C e a concentração de HCl Padrão (12%), onde conseguiu-se replicar o resultado do teste. Após uma semana de teste desses parâmetros em produção, os resultados foram confirmados e o processo foi alterado para a composição supracitada.

Para avaliar o efeito da temperatura sobre a variável resposta, foi realizada uma ANOVA de um fator com três níveis (10°C, 25°C e 40°C). A hipótese nula (H_0) estabelece que todas as médias são iguais, enquanto a hipótese alternativa (H_1) indica que pelo menos uma média difere significativamente. O nível de significância adotado foi de $\alpha=0,05$, assumindo igualdade de variâncias entre os grupos.

Os resultados da ANOVA (Tabela 5) demonstram que a fonte de variação “Temperatura” apresentou um valor de $F=175,46$ e um valor-p de 0,001, inferior ao nível de significância, indicando rejeição da hipótese nula. Portanto, conclui-se que a temperatura exerce efeito significativo sobre a variável resposta.

Tabela 5 – Resultado da ANOVA

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Temperatura	2	2153,27	1076,63	175,46	0,001
Erro	3	18,41	6,14		
Total	5	2171,68			

Fonte: autor

A Tabela 6 evidencia o sumário do modelo:

Tabela 6 – Sumário do Modelo

S	R^2	$R^2(aj)$	$R^2(pred)$
2,4771	99,15%	98,59%	96,61%

Fonte: autor

O coeficiente de determinação ($R^2=99,15\%$) indica que quase toda a variação da resposta é explicada pelo fator temperatura, reforçando a robustez do modelo. O desvio padrão combinado (S) foi de 2,48, sugerindo baixa variabilidade residual.

A Tabela 7, mostra que as médias por nível de temperatura revelam diferenças expressivas: 44,75 para 10 °C, 5,37 para 25 °C e 3,80 para 40 °C. Os intervalos de confiança de 95% confirmam que a média a 10 °C é significativamente maior que as demais, enquanto as médias a 25 °C e 40 °C apresentam sobreposição parcial, sugerindo menor diferença entre elas.

Tabela 7 – Análise das Médias e IC

Temperatura	N	Média	DesvPad	IC de 95%
10	2	44,75	3,89	(39,18; 50,32)
25	2	5,37	1,45	(-0,20; 10,95)
40	2	3,8	1,084	(-1,774; 9,374)

Fonte: autor

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E DISCUSSÃO

Analisando os Gráficos 5, 6 e 7, percebe-se que o efeito da temperatura abaixo de 25°C aumenta demasiadamente o tempo de decapagem. Contudo, o aumento de temperatura entre 25°C e 40°C não gera uma melhoria significativa no tempo de decapagem.

Com estas informações, visto que os parâmetros já estavam estáveis em produção, a empresa tomou a decisão de investimento em um sistema de controle de temperatura (resistências térmicas) nos tanques de decapagem química, fazendo com que se estabilizem o tempo de decapagem durante o período noturno, bem como a possibilidade de estabilização em dias mais frios ou no inverno (visto que essa era uma “dor” de longa data para a produção).

O controle estabelecido prevê que a resistência ligue quando a temperatura do banho caia abaixo de 25°C e desligue quando a temperatura do tanque atinja 50°C.

Essa ação gerou um ganho de quantidade de cestos (peças) produzidas, no terceiro turno, na ordem de 30%, fazendo com que praticamente se iguale a quantidade de peças produzidas nos demais turnos.

Outro ponto a ser exposto é que, o controle dos banhos ficou mais robusto, bem como o tempo de troca desses. Com essa nova configuração, aumentou em 4 dias a troca dos banhos. Ou seja, antes se trocavam a cada 30 dias em média (sempre analisando a concentração de Cloreto de Ferro (FeCl_3) x Ácido Clorídrico (HCl) e, após a mudança e melhorias, são trocados a cada 34 dias, uma melhora de 13%. Com isso tem-se a redução da troca de banho de em média de 1 tanque por ano, gerando um impacto ambiental significativo (pilar E do ESG).

Ainda assim, foram consultadas várias empresas para a tratativa de destino e/ou reciclagem desse resíduo afim de gerar um resíduo mais ambientalmente correto (o mesmo é considerado resíduo Classe 1 – Perigoso). A solução encontrada foi a de coprocessamento, através do processo de “blendagem”, que é a mistura de resíduos líquidos que são descaracterizados de forma a gerar um combustível com um poder calorífico adequado, diminuindo o passivo ambiental da empresa. Esse processo é mais caro que o descarte em aterros, mas expressivamente melhor ambientalmente, com impacto direto no pilar E do ESG. Essa decisão está em estudo pela empresa.

6 CONCLUSÃO

A aplicação do Método de Taguchi demonstrou ser uma abordagem eficaz para otimizar o processo de decapagem química industrial, conciliando qualidade, eficiência e sustentabilidade. Os resultados obtidos evidenciam que o uso de ferramentas estatísticas robustas não apenas reduz custos e desperdícios, mas também contribui para maior segurança operacional e menor impacto ambiental. Assim, este trabalho se apresenta como proposta de um modelo replicável e adaptável, capaz de gerar ganhos significativos para a indústria de transformação metálica.

Fazendo a reflexão sobre os objetivos deste trabalho e os atingimentos desses, podem ser resumidos na Quadro 1:

Quadro 1 – Resumo dos Resultados Propostos

Objetivos	Resultado	Observação
- Proposta metodológica para melhorar o processo de decapagem química, a partir da análise da influência de diferentes fatores por meio de experimentação sistemática.	Positivo	Ajuste dos parâmetros de decapagem com determinação dos mais significantes
- Aprofundar o entendimento e o controle sobre as variáveis do processo de decapagem química, com foco na melhoria da qualidade final e da eficiência operacional;	Positivo	Ajuste dos parâmetros de decapagem com inserção de controle de temperatura nos banhos
- Avaliar a viabilidade de incremento da produtividade com base nas relações identificadas através das análises experimentais realizadas.	Positivo	Ganhos na ordem de 30% em 1 turno

Fonte: autor

Com o exposto, entende-se que todos os pontos propostos foram atingidos com excelência neste trabalho. Lembrando que esse processo já contempla o compartilhamento dessas informações com a Academia e com as empresas que necessitem dessa informação e/ou atividade.

O estudo demonstrou que o uso estruturado de ferramentas de experimentação, como o método de Taguchi, é capaz de transformar um processo

tradicionalmente empírico — como a decapagem química — em um processo guiado por evidências, com ganhos expressivos em eficiência, previsibilidade e controle. O trabalho aqui apresentado contribui, portanto, para a consolidação de práticas de excelência em engenharia de processos, e abre novas possibilidades para a evolução tecnológica e sustentável da indústria de transformação, bem como a aplicação em demais empresas de maior ou menor porte que tenham outro componente decapante ou decapado. Ainda assim, a comparação com outros métodos ou técnicas podem ser aplicados para a melhor exploração deste tema.

REFERÊNCIAS

- BARRAHI, A.; ADLANI, L.; EL FAYDY, M.; BENHIBA, F.; KAICHOUH, G.; BAZANOV, D. R.; ZARROUK, A. Experimental and theoretical investigations into the corrosion-reduction capabilities of a novel imidazole derivative for acid pickling of carbon steel. **Journal of Dispersion Science and Technology**, London, p. 1-16, 2025.
- BOUKHEDENA, W.; DEGHBOUDJ, S. Experimental study and mathematical modeling of the corrosion inhibition of mild steel with an organic compound in 1M HCl. **Journal of Electrochemical Science and Engineering**, Zagreb, v. 11, n. 4, p. 227-239, 2021.
- BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. **Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery**. New Jersey: Wiley Interscience, 2005.
- CHAOUCHE, R.; TISKAR, M.; LARHLID, I.; IHAMDANE, R.; EL AMRI, A.; MANSOUR, A. A.; HSISSOU, R.; SALGHI, R.; CHEIKHI, N.; CHAOUCH, A.; HABSAOUI, A. Exploring of the Origanum Compactum essential oil as an ecofriendly corrosion inhibitor for mild steel in 1M HCl environment: Experimental, DFT, MD, DFTB and PDOS approaches. **Journal of Molecular Structure**, Amsterdam, v. 1327, 137397, 2025.
- CRAMER, S. D.; COVINO JUNIOR, B. S. **ASM metals handbook: corrosion: environments and industries**. v. 13C. Novelty: ASM International, 2006.
- CRİŞAN, C. A.; VERMEŞAN, H. Natural gums as green corrosion inhibitors for mild steel. **E3S Web of Conferences**, Singapura, v. 550, 01010, 2024.
- CUI, X.; WANG, J.; SUN, J.; ELMI, S. A.; LI, X.; BAI, Z. Numerical simulation of turbulence intensity of an acid solution during the strip steel pickling process. **Metals**, Basileia, v. 13, n. 7, p. 1293, 2023.
- DAGDEVIR, T.; OZCEYHAN, V. Optimization of process parameters in terms of stabilization and thermal conductivity on water based TiO₂ nanofluid preparation by using Taguchi method and Grey relation analysis. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, Oxford, v. 120, 105021, 2021.
- DURAKOVIC, B.; PRAKASH MARIMUTHU, K. Minimization of Milling-Induced Residual Stresses in AISI 1045 Steel: Process Optimization using Design of Experiments Taguchi Method. **Journal of Materials Engineering and Performance**, New York, v. 33, n. 13, p. 7721-7727, 2024.
- EL-KIRI, Z.; DAKHSI, K.; DKHIRECHE, N.; HMADA, A.; BIDI, H.; BENHIBA, F.; GALAI, M.; HSISSOU, R.; HABSAOUI, A.; EBN TOUHAMI, M. Correlation between experimental and theoretical approaches in the performance of new epoxy resin as an effective corrosion inhibitor for mild steel in acid pickling bath. **International Journal of Corrosion and Scale Inhibition**, Moscou, v. 13, n. 2, p. 823-852, 2024.

EL-TABEI, A. S.; HEGAZY, M. A.; BEDAIR, A. H.; EL BASIONY, N.; SADEQ, M. A. Experimental and theoretical (DFT & MC) studies for newly synthesized cationic amphiphilic substance based on a naphthol moiety as corrosion inhibitor for carbon steel during the pickling process. **Journal of Molecular Liquids**, Amsterdam, v. 331, 115692, 2021.

FREIRE, L.; NÓVOA, X. R.; MONTEMOR, M. F.; CARMEZIM, M. J. Study of passive films formed on mild steel in alkaline media by the application of anodic potentials. **Materials Chemistry and Physics**, Lausanne, v. 114, n. 2-3, p. 962-972, 2009.
GENTIL, V.; CARVALHO, L. J. **Corrosão**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022.

GOMES, F. M.; YMAMURA, C. S.; SAMPAIO, N. A. D.; PEREIRA, F. M.; ANDRADE, H. D.; SILVA, M. B. Optimization of Multiple Response Processes Using Different Modelling Techniques. **Quality Innovation Prosperity**, Košice, v. 27, n. 3, p. 18-36, 2023.

GRIMA-CARMENA, L.; GINER-SANZ, J. J.; POCOVÍ-MARTÍNEZ, S.; BOSCH-MOSSÍ, F.; PÉREZ-HERRANZ, V. Study of the effect of the pretreatment and the concentrations of iron (II) and chloride, on the electrochemical leaching of waste printed circuit boards using ANOVA analysis. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, Seul, v. 152, p. 234-244, 2025.

HSISSOU, R.; BENASSAOUI, H.; BENHIBA, F.; HAJJAJI, N.; ALHARBI, A. Application of a new tri-functional epoxy prepolymer, triglycidyl ethylene ether of bisphenol A, in the coating of E24 steel in 3.5 % NaCl. **Journal of Chemical Technology and Metallurgy**, Sofia, v. 52, n. 3, p. 431-438, 2017.

JAMALUDDIN, H.; GHANI, J. A.; BABA, M. D.; AB RAHMAN, M. N.; RAMLI, R. Quality improvement using Taguchi method in shot blasting process. **Journal of Mechanical Engineering and Sciences**, Pekan, v. 10, n. 2, p. 2201-2210, 2016.

KHODDAMI, A.; JAHROODI, M. A. N.; SALIMI-MAJD, D. *et al.* Numerical and experimental prediction of erosion in dental implants during dry micro-blasting process. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 133, p. 235-256, 2024.

LANGLEY, G. J.; NOLAN, K. M.; NOLAN, T. W.; NORMAN, C. L.; PROVOST, L. P. **The Improvement Guide: A Practical Approach to Enhancing Organizational Performance**. San Francisco: Jossey-Bass/Wiley, 2009.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. New York: John Wiley & Sons, 2012.

NETO, B. B.; SCARMÍNIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.

OLIVEIRA, A. D.; BETTENCOURT, G. F.; SANTOS, J. L. C.; JESUS, D. F. G.; ALMEIDA, T. C. Corrosion resistance of unlacquered chromium-plated steel sheets – study on the influence of pickling and chemical treatment steps of the production

process. **Materials Research**, São Carlos, v. 27, supl. 1, e20230349, 2024.

ÖZAKIN, B. Optimization of pickling and annealing parameters in cold rolling using the Taguchi method. **Materialwissenschaft und Werkstofftechnik**, Darmstadt, v. 54, p. 1223-1231, 2023.

RADIONOVA, L. V.; GROMOV, D. V.; SVISTUN, A. S.; LISOVSKIY, R. A.; FAIZOV, S. R.; GLEBOV, L. A.; ZARAMENSKIKH, S. E.; BYKOV, V. A.; ERDAKOV, I. N. Mathematical Modeling of Heating and Strain Aging of Steel during High-Speed Wire Drawing. **Metals**, Basileia, v. 12, n. 9, p. 1472, 2022.

RAI, S.; WASEWAR, K. L.; LATAYE, D. H.; MISHRA, R. S.; PUTTEWAR, S. P.; CHADDHA, M. J.; MAHINDIRAN, P.; MUKHOPADHYAY, J. Neutralization of red mud with pickling waste liquor using taguchi's design of experimental methodology. **Waste Management & Research**, London, v. 30, n. 9, p. 922-930, 2012.

RAMESH, B. B.; HOLZE, R. Corrosion and hydrogen permeation inhibition for mild steel in HCl by isomers of organic compounds. **British Corrosion Journal**, London, v. 35, n. 3, p. 204-209, 2000.

REGHURAJ, A. R.; SAJU, K.; RITWIK, A. Taguchi method and box-behnken design approach for process parameter optimization of magnetite (Fe_3O_4) coating developed on stainless steel 410 grade by hot alkaline treatment. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering**, Thousand Oaks, v. 237, n. 4, p. 1583-1594, 2022.

SAE INTERNATIONAL. **J403**: Chemical compositions of SAE carbon steels. Revised December 2009. Warrendale: SAE International, 2009.

SAHOO, S.; JHA, B. B.; MANTRY, S. Optimization of process parameters of hot consolidated steel matrix composites by taguchi method. **JOM**, Pittsburgh, v. 76, p. 818-828, 2024.

SHI, C.; ZHANG, Y.; ZHOU, S.; JIANG, J.; HUANG, X.; HUA, J. Status of research on the resource utilization of stainless steel pickling sludge in China: a review. **Environmental Science and Pollution Research International**, Berlim, v. 30, n. 39, p. 90223-90242, 2023.

SHOJAEI, S.; SHOJAEI, S.; BAND, S. S.; FARIZHANDI, A. A. K.; GHOROQI, M.; MOSAVI, A. Application of taguchi method and response surface methodology into the removal of malachite green and auramine-O by NaX nanozeolites. **Scientific Reports**, London, v. 11, n. 1, p. 16054, 2021.

SINGH, R.; RANJAN, N. Experimental investigations for preparation of biocompatible feedstock filament of fused deposition modeling (FDM) using twin screw extrusion process. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, London, v. 31, n. 11, p. 1455-1469, 2017.

SILVA, M. G.; ARAUJO, R. G.; SILVÉRIO, R. L.; COSTA, A. N. C.; SANGI, D. P.; PEDROSA, L. F.; FONSECA, G. S.; SILVA, L.; COELHO, L. W.; FERREIRA, E. A.

Inhibition effects of ionic and non-ionic derivatives of imidazole compounds on hydrogen permeation during carbon steel pickling. **Journal of Materials Research and Technology**, Rio de Janeiro, v. 16, p. 1324-1338, 2022.

SILVA, M. G.; COSTA, A. N. C.; SANGI, D. P.; YONEDA, J.; COELHO, L. W.; FERREIRA, E. A. Comparative study of oxazolidine and imidazolidine compounds as inhibitors of SAE 1020 steel corrosion in aqueous HCl solution. **Chemical Engineering Communications**, Philadelphia, v. 209, n. 9, p. 1165–1181, 2021.

SILVÉRIO, R. L.; PORTUGAL, P. M.; AMORIM, R. G.; SANGI, D. P.; ANTUNES, G. R.; COELHO, L. W.; PANDEY, R.; FERREIRA, E. A. High inhibition efficiency and hydrogen permeation for novel N-heterocycles of SAE 1020 in HCl solution. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, Seul, v. 154, p. 473-486, 2025.

TAGUCHI, G.; CHOWDHURY, S.; WU, Y. **Taguchi's Quality Engineering Handbook**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.

TUNÇEL, O. Optimization of Charpy Impact Strength of Tough PLA Samples Produced by 3D Printing Using the Taguchi Method. **Polymers**, Basileia, v. 16, n. 4, p. 459, 2024.

VERMA, C.; SAJI, V. S.; QURAISHI, M. A.; EBENSO, E. E. Pyrazole Derivatives as environmental benign acid corrosion inhibitors for mild steel: Experimental and Computational Studies. **Journal of Molecular Liquids**, Amsterdam, v. 298, p. 111943, 2020.

WU, C.-Y.; CHANG, C.-Y.; TSAI, S.-W.; LIN, S.-C.; HSU, T.-C.; HSIEH, T.-H. Activated carbon for supercapacitor electrodes produced by the carbonation and activation of glucose with potassium nitrate. **ACS Applied Energy Materials**, Washington, v. 7, n. 16, p. 6873-6886, 2024.

YIN, R. K. **Case Study Research: Design and Methods**. 5. ed. London: Sage, 2014.

YARO, A. S.; KHADOM, A. A.; YASSEM, S. R. Comparative studies of taguchi dynamic analysis, statistical, and artificial neural networks for low-carbon steel corrosion inhibition in acidic media. **Results in Surfaces and Interfaces**, Amsterdam, v. 17, p. 100322, 2024.

ZHENG, J.; BO, J.; NING, L.; ZHANG, B.; WANG, Y.; LIU, X. Effect of pickling on stress corrosion cracking of S31603 heat exchanger tubes. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, New York, v. 25, p. 923–929, 2025.

ZHOU, Q.; SUN, Y.; WANG, X.; TAN, X.; JIANG, Y.; LI, J. Pitting behavior of austenitic stainless-steel welded joints with dense inclusions and methods to enhance pitting resistance. **Anti-Corrosion Methods and Materials**, Bingley, v. 71, n. 6, p. 764-777, 2024.

DADOS CURRICULARES

IDENTIFICAÇÃO	
	RAUL VITOR MENDES PEREIRA 09/FEVEREIRO/1978
Nacionalidade	brasileira
Nome em citações bibliográficas:	Pereira, Raul Vitor Mendes Pereira, R. V. M.
Currículo Lattes	URL: https://lattes.cnpq.br/5874623272123356
ORCID	URL: https://orcid.org/0009-0002-4075-562X
outro identificador	URL
FORMAÇÃO ACADÊMICA	
Dez/2000	Engenharia Mecânica UNESP - FEG
PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA	
Pereira, R. V. M., Silva, M. B., & Junior, L. G. V. (2025). Otimização do processo de decapagem química com Método de Taguchi. Cuadernos De Educación Y Desarrollo, 17(9), e9366. https://doi.org/10.55905/cuadv17n9-043	
PARTICIPAÇÃO EM BANCAS E ORIENTAÇÕES	
Bancas de trabalhos de conclusão	
RODRIGUES, M.G.: Definição dos Parâmetros para a Melhoria da Eficiência do Processo de Decapagem Química – Monografia de Conclusão de Curso. FEG – UNESP – Guaratinguetá, 2005.	
Orientações	
-	
PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS CIENTÍFICOS	
INDUSCON, 16., 2025, (São Sebastião). Análise de experimentos de um processo de decapagem química. 2025.	