PRODUÇÃO MAIS LIMPA (P+L) APLICADA À PINTURA ELETROSTÁTICA NO SETOR METALMECÂNICO

Ligia Mayer Rodrigues[1], Ana Carolina Manfré Custodio[2], Gabriela Ayumi Kishimoto[2], Leonardo Davi Armacolo Giocondo[2], Djeine Cristina Schiavon Maia[2], Alexandre Diório[2]

[1]Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil (ra147863@uem.br)
[2]Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil

Resumo: O trabalho analisa a aplicação da Produção mais Limpa (P+L) na pintura eletrostática do setor metalmecânico, destacando sua contribuição para reduzir impactos ambientais e aumentar a eficiência produtiva. Aborda conceitos da P+L, funcionamento do processo, vantagens, limitações e ganhos como menor desperdício de tinta, reaproveitamento de materiais, economia de energia e redução de retrabalho, com apoio de ferramentas de melhoria contínua.

Palavras-chave: Pintura eletrostática; produção mais limpa; ferramentas de melhoria de processo.

INTRODUÇÃO

A partir da segunda metade do século XX, houve um aumento na preocupação e na discussão acerca da responsabilidade social sustentável, bem como das questões econômicas. Nesse contexto, a mudança de pensamento e a conscientização sobre o meio ambiente passaram a se destacar como temas relevantes tanto no meio industrial quanto no social (LIMA et al., 2019).

Com a propagação do termo sustentabilidade, o conceito Tripé da Sustentabilidade ganhou maior repercussão no final da década de 1990. Esse modelo compreende a viabilidade dos negócios das empresas diante dos aspectos econômicos, sociais e ambientais. Dessa forma, as empresas não devem apenas avaliar sua performance econômica, mas também considerar os impactos ambientais. Sendo assim, o Tripé da Sustentabilidade abrange três dimensões - econômica, social e ambiental - os quais atuam como pilares para o desenvolvimento industrial sustentável (LIMA et al., 2019).

Em processos industriais, desde a fabricação de um produto até o seu acabamento, normalmente são gerados resíduos sólidos e emissões atmosféricas, os quais provocam impactos ambientais. Além disso, esses processos também geram desperdícios para as empresas, exigindo altos investimentos em controle ambiental e garantia da qualidade. Nesse contexto, a mudança de foco do tratamento desses impactos para a sua prevenção tem contribuído para a implementação e o desenvolvimento de um novo modelo de produção, conhecido como Produção mais limpa (P+L) (DRUMOND, 2013).

A Produção mais Limpa (P+L) é um modelo proposto pela PNUMA (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente), em 1989. Seu objetivo é integrar questões ambientais, a partir da redução do volume e da toxicidade de resíduos, buscando maior eficiência (DRUMOND, 2013).

A utilização de tintas em pó surgiu por volta de 1950, nos Estados Unidos, sendo amplamente empregada em revestimentos anticorrosivos e no isolamento elétrico. No início da década de 1960, a necessidade de métodos de aplicação mais eficientes levou ao desenvolvimento da pintura eletrostática (FARIA, 2021).

O presente trabalho tem como objetivo analisar os princípios de P+L aplicados à redução de desperdícios, à melhoria da eficiência produtiva e ao aumento da sustentabilidade em empresas de Pintura Eletrostática, buscando responder à seguinte questão: “Como essas estratégias têm sido utilizadas para otimizar processos de pintura eletrostática no setor industrial?”

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa de natureza aplicada, com abordagem qualitativa e objetivo descritivo, voltada à análise da utilização dos princípios da Produção mais Limpa (P+L) no processo de pintura eletrostática no setor metalmecânico. Quanto a metodologia, realizou-se uma pesquisa bibliográfica, tomando como base em

livros, artigos científicos, trabalhos acadêmicos, normas técnicas, além de publicações institucionais relacionadas aos temas de sustentabilidade industrial, gestão ambiental, Produção mais Limpa e pintura eletrostática. A coleta de informações permitiu a identificação de conceitos, vantagens, limitações e aplicações práticas dessas metodologias no ambiente industrial.

Dessa forma, os dados obtidos na literatura, foram estruturados e compreendidos de maneira comparativa, buscando apresentar como a adoção dessas práticas pode contribuir para ganhos econômicos, produtivos e ambientais nas empresas do setor industrial.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

1. Produção mais limpa (P+L)

1.1 Conceitos e definições

No Brasil, a Produção Mais Limpa (P+L) ganhou força como metodologia após a Rio 92, estabelecendo um novo modelo onde a poluição passa a ser vista como sinônimo de desperdício (WARNER, 2013). A Produção Mais Limpa consiste na aplicação contínua de estratégias ambientais preventivas e integrada aos processos, produtos e serviços, além de gerar benefícios econômicos e promover mudanças organizacionais (VIEIRA; AMARAL, 2016).

Essa metodologia propõe a análise do uso de insumos nos processos produtivos, incentivando a busca por alternativas que tornem o ciclo produtivo mais eficiente e sustentável. Nessa abordagem, as questões ambientais se tornam o tema central, sendo os impactos frequentemente associados ao ritmo intensivo de produção (WARNER, 2013).

Para conseguir essa mudança, a P+L tem uma visão sistêmica do processo produtivo. Sendo assim, ela avalia toda a cadeia produtiva, em busca de torná-la mais sustentável e com menos impactos ambientais (WARNER, 2013).

1.2. Princípios da P+L

A Produção Mais Limpa baseia-se em uma abordagem preventiva aplicada aos processos produtivos, com o objetivo de minimizar os impactos ambientais. De acordo com Fernandes (2001), seu primeiro e principal pilar é a não geração de resíduos, sendo que isso deve ser feito mediante a forma como os processos são realizados e sua tecnologia.

Nesse sentido, a redução da geração de resíduos aparece como uma consequência direta dessa abordagem, sendo também reconhecida como um de seus pilares fundamentais e deve ser realizada quando a primeira não é possível (FERNANDES, 2015).

Outro ponto importante para a P+L é um dos estágios iniciais que possam ser feitos pelas empresas, está na reciclagem com uso dos produtos gerados para se evitar que novas poluições sejam lançadas ao meio ambiente (FERNANDES, 2001)

Para alcançar esses objetivos, tornam-se essenciais as tecnologias que aumentam a eficiência dos processos operacionais e possibilitam o reaproveitamento de subprodutos, contribuindo para a diminuição do consumo de recursos naturais e para a redução significativa da geração de resíduos (SILVA,2022).

1.3. P+L versus tecnologias de fim de tubo

A Produção Mais Limpa (P+L) difere das tecnologias de fim de tubo em relação à maneira como essa lida com os impactos ambientais. Enquanto a P+L possui uma abordagem que visa, acima de tudo, prevenir, ou seja, ela atua na origem do problema por meio da otimização de processos, uso eficiente de recursos e não geração de resíduos, as tecnologias de fim de tubo são corretivas, sendo aplicadas apenas após a geração dos poluentes (PERNAMBUCO, 2021).

As tecnologias de fim de tubo buscam soluções para lidar com o resíduo, ou seja, nessa abordagem a geração já ocorreu e o foco, portanto, está em tratá-lo. Isso é feito por meio do tratamento de resíduos, da separação e concentração, da incineração e da disposição final; ou seja, busca-se reduzir os danos sem que a causa seja o foco (FERNANDES, 2001).

Assim, embora as tecnologias de fim de tubo sejam importantes para o controle ambiental, a P+L se destaca por ser mais eficiente e sustentável, pois reduz custos, minimiza desperdícios e evita a formação de resíduos desde o início do processo produtivo.

2. Pintura eletrostática no Setor Industrial

2.1. Descrição do Processo

A pintura eletrostática consiste em uma tecnologia superior de revestimento de superfícies metálicas, as quais são tratadas termicamente. Sua principal finalidade é tornar os produtos mais resistentes ao desgaste e à abrasão. Essa atividade é utilizada praticamente em todos os setores, desde arquitetura, aeronáutica, máquinas e equipamentos, até utensílios domésticos e entre outros (BOER et al., 2020).

Diferente das tintas líquidas que utilizam processos de imersão e pincéis, com a tinta em pó utilizam-se de processos mais avançados como o eletrostático. Os quatro principais métodos são de leito fluidizado, leito fluidizado eletrostático, pistola eletrostática com efeito corona e pistola eletrostática com efeito tribo (FARIA, 2021).

2.1.1. Leito fluidizado simples

Leito fluidizado é definido sendo um sistema no qual as partículas sólidas passam a apresentar comportamento semelhante ao de fluidos. Para isso, deve-se submeter essas partículas à um fluxo de gás ou líquido fazendo com que adquiram velocidade suficiente para serem suportadas (FARIA, 2021).

2.1.2. Leito fluidizado eletrostático

Parte do mesmo princípio do leito fluidizado simples, porém, as partículas são carregadas eletrostaticamente, depois as peças são penduradas em suportes metálicos, fazendo com que as cargas contrárias se atraiam. Esse tipo de pintura possibilita maior controle da camada resultante, como também a pintura de peças com geometria complexa e maior uniformidade da pintura (FARIA, 2021).

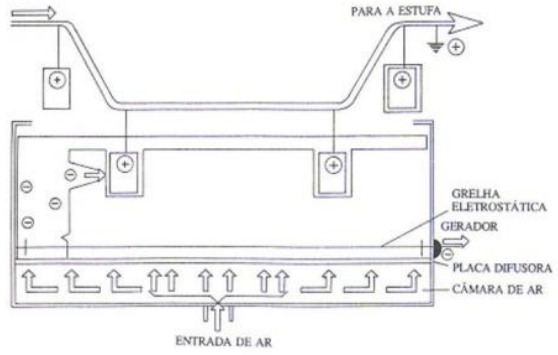


Figura 1 – Desenho esquemático sistema de pintura por leito fluidizado eletrostático. Fonte: FARIA, 2021.

2.1.3. Pistola eletrostática com efeito corona

Pistolas eletrostáticas são um dos métodos mais utilizados atualmente, pois tratam de equipamentos mais precisos, tendo como finalidade dar um melhor acabamento para cada produto de interesse. As pistolas eletrostáticas com efeito corona baseiam-se no princípio de que um campo elétrico gerado pela descarga de íons gasosos, na extremidade de uma fonte de alta diferença de potencial, provoca uma descarga no ar ao redor do eletrodo (FARIA, 2021).



Figura 2 – Equipamento de pintura manual por efeito corona.

2.1.4. Pistola eletrostática com efeito tribo

As pistolas eletrostáticas de efeito tribo partem do conceito de que a eletrização dos corpos acontece pelo ato de "esfregar" dois corpos isolantes, fazendo com que o corpo que tenha mais cargas do mesmo sinal "pegue" as cargas do outro. Dessa forma, faz com que um fique com uma carga e o outro com carga oposta (FARIA, 2021).

Nem todas as tintas podem ser aplicadas por esse método, por conta de existirem materiais que sejam bons doadores de elétrons como as epóxi e, portanto, precisam de aditivos específicos para o uso (FARIA, 2021).

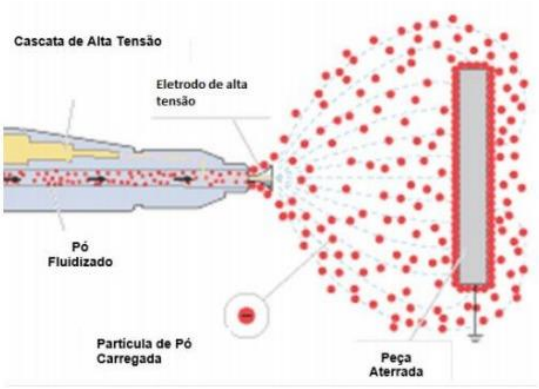


Figura 3 – Desenho esquemático sistema de pintura por pistola eletrostática com efeito tribo. Fonte: FARIA, 2021.

2.2. Vantagens e limitações

As principais razões para se utilizar o método de pintura eletrostática são: alta aderência aos objetos pintados, alto poder de cobertura, alta resistência à abrasão, alta resistência aos desgastes, alta resistência a agentes corrosivos e possui camada de tinta fina e uniforme (BOER et al., 2020).

Os revestimentos de superfícies, conhecidos como tintas, são polímeros utilizados tanto para a proteção de superfícies quanto para a decoração dela. A tinta em pó, é a tinta em que seu estado físico se encontra 100 % sólida (FARIA, 2021).

As principais vantagens de se utilizar a tinta em pó são: não gera poluentes gasosos, precisa de uma única aplicação, é pronta para o uso, dispensa o uso de solvente, possui baixo índice de rejeição e baixo risco de incêndio. Porém, suas limitações são: troca de cor mais demorada, não se pode misturar diferentes tintas, difícil aplicação de camadas muito pequenas, não cobre partes internas como na imersão e são de difícil aplicação em materiais não metálicos (FARIA, 2021).

A pintura eletrostática possui vantagens quando se trata do meio ambiente, pois não necessita de solventes durante a aplicação. Dessa forma, não

causa poluição atmosférica, e nem por contaminantes no solo e efluentes. Também, o tempo necessário para este método é menor, pois não há zonas onde é preciso esperar a evaporação de solventes. Em termos de rendimento, esse tipo de pintura consiste no método mais econômico, visto que, caso a tinta for coletada e reutilizada, terá um menor desperdício, resultando em um rendimento de aproximadamente 98% do material (FARIA, 2021).

2.3. Impactos Ambientais

A sustentabilidade tem se tornado um ponto essencial nas indústrias ao redor do mundo, refletindo práticas que buscam equilibrar aspectos econômicos, sociais e ambientais. Nesse contexto, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) estabelece diretrizes para gestão de resíduos industriais, incentivando o reaproveitamento e reciclagem dos materiais, tendo como o objetivo, reduzir a quantidade de resíduos destinados aos aterros sanitários (SOUZA et al., 2025).

Um ponto importante a ser analisado é como as indústrias realizam a gestão de seus resíduos. No caso da pintura eletrostática, os resíduos que são gerados representam um dos maiores desafios do processo. No entanto, com tecnologias adequadas de reciclagem, é possível transformar esses materiais de resíduos para novos produtos (SOUZA et al., 2025).

A pintura eletrostática é um processo amplamente utilizado na indústria, especialmente pelo uso de tinta em pó. Apesar de suas vantagens, esse tipo de pintura pode gerar resíduos em quantidades significativas, os quais contêm metais pesados e substâncias tóxicas. Por isso, é fundamental garantir uma gestão adequada dos resíduos da indústria, a fim de evitar danos ambientais (SOUZA et al., 2025).

3. Aplicações da Produção mais limpa na Pintura Eletrostática

3.1. Redução de desperdícios de tinta

A pintura eletrostática possui uma eficiência de transferência significativa, sendo capaz de alcançar valores consideráveis entre 80~90%, como apontado por estudos realizados por Prasad, McGinity e Williams III (2016), demonstrando redução relevante no desperdício de tinta quando comparado a outros métodos. Ademais, denota-se a viabilidade de reutilização do pó não aderido, colaborando para a diminuição de resíduos sólidos, demonstrando ligação com os fundamentos da P+L. Além disso, estudos realizados por Khan et al. (2012) apontam reduções significativas de até 68% na aplicação de material e 84% na produção de partículas, destacando sua aplicabilidade ambientalmente adequada.

3.2. Reaproveitamento de materiais

A pintura eletrostática tem como principal vantagem a coleta total dos materiais em excesso que não se aderiram ao componente e posteriormente reciclá-lo como pó recuperado.

Quanto à eficiência na recuperação do pó, diferentes fatores podem influenciá-la, como o material do revestimento em pó, a forma e o tamanho do objeto, além das modificações no dispositivo e ambiente de aplicação. Apesar da possibilidade de atingir cerca de 100% do material através da recuperação do pó em excesso, produzido na pulverização, as propriedades de fluxo do pó recuperado possuem tendência a se deteriorar, tomando maior dificuldade em relação ao manuseamento e aplicação do pó reaproveitado (FU et al., 2011).

3.3. Otimização do processo produtivo

A adoção dos princípios de Produção mais Limpa na pintura eletrostática também está associada à otimização das etapas eficientes. O uso de equipamentos modernos e sistemas de controle de aplicação, possibilita maior uniformidade no revestimento, redução do tempo de tratamento e melhor aproveitamento da matéria-prima.

Além disso, a uniformização dos processos reduz o mau funcionamento dos processos, melhora a eficiência e proporciona maior regularidade nos resultados. Segundo Boer e Blaga (2020), a atualização dos sistemas de pintura eletrostática pode diminuir custos operacionais e aumentar a concorrência industrial.

Outro aspecto de importância é a distribuição do processo produtivo, evitando dificuldades entre etapas como a preparação da superfície, pintura e cura térmica, tornando o processo mais proveitoso e sustentável.

3.4. Eficiência energética

A eficiência energética representa uma das principais vantagens referentes a aplicação da Produção mais Limpa nos processos de pintura eletrostática. Como o processo emprega tintas em pó sem solventes, extinguindo a necessidade de sistemas de exaustão complexos designados à remoção de compostos orgânicos voláteis, e consequentemente reduzindo o consumo energético global da operação.

Além disso, fornos modernos de cura térmica possuem sistemas de isolamento térmico e controle automatizado de temperatura, reduzindo o desperdício de energia. A manutenção preventiva desses equipamentos também se encontra vantajosa no aspecto de desempenho energético.

Segundo a UNEP (2002), medidas voltadas à racionalização energética em processos industriais

representam uma das estratégias centrais da P+L, promovendo conjuntamente ganhos de particularidades ambientais e econômicas.

3.5. Redução de retrabalho

O retrabalho industrial está relacionado a defeitos de acabamento, falhas de cobertura, espessura inadequada da camada aplicada ou problemas de aderência. Na pintura eletrostática, a elevada homogeneidade de aplicação reduz drasticamente os empecilhos citados anteriormente, quando comparada a métodos convencionais. Com menor índice de falhas, há um restringimento da necessidade de repintura, menor aplicação adicional de tinta, bem como de energia e mão de obra. Assim sendo, ocorre aumento do rendimento e diminuição dos custos operacionais.

Ademais, a averiguação da qualidade durante o processo, de maneira conjunta ao treinamento adequado dos operadores, colabora para minimização dos erros e garantia em uma maior conformidade do produto acabado. Dessa maneira, a redução de retrabalho fortalece os princípios da Produção mais Limpa ao evitar desperdícios e elevar a eficiência produtiva.

4. Análise de Desempenho em P+L

A análise de desempenho se mostra necessária em diversos setores da sociedade e da economia. Devido às crescentes ameaças ambientais, com impactos cada vez mais severos, essa área é vista com grande atenção quando da elaboração ou reelaboração de processos. Pode-se realizá-la através de diversos métodos, os quais podem ser aplicados em consonância para o atingimento dos objetivos postulados e permitem a conclusão a respeito do funcionamento global ou de alguma parte específica dos processos. Alguns métodos frequentemente observados frente a tais questões são os parâmetros de desempenho chave (KPI), os protocolos de qualidade e as ferramentas de digitalização (PAPAMICHAEL et al., 2023; ISO, 2021).

Os indicadores de análise de desempenho são frequentemente descritos em termos dos “Key Performance Indicators”, da sigla em inglês KPIs para indicadores chave nesse contexto. Quanto à produção mais limpa, são parte fundamental de sua proposição. Advindos da norma ISO 14031, um protocolo de qualidade, refletem a necessidade de se postular as indicações e considerações que uma determinada organização pertencente à cadeia produtiva deve ter para que mapeie e execute ações diretamente relacionadas à gestão de seus processos, serviços e produtos, instigando seu maior controle ambiental e econômico. Ressalta-se que não é necessária a utilização conjunta de todos os indicadores, podendo-se usar aqueles que melhor atendem às necessidades das corporações em relação às suas atividades (XU et al., 2024).

A norma supracitada (ISO 14031) é baseada em uma análise de desempenho ambiental (EPE, em inglês) que pode ajudar em tomadas de decisão de empresas de diversos tamanhos e influência quanto à sustentabilidade, auxiliando ou baseando seu sistema de planejamento. Tal análise é dividida em indicadores de condições ambientais (ECI, em inglês) e em indicadores de desempenho ambiental (EPI), sendo este dividido em indicadores de desempenho de gestão (MPI) e em indicadores de desempenho operacional (OPI) (ISO, 2021). Os ECI podem ser utilizados apenas quando os impactos ambientais são relacionados apenas à organização em que a análise é feita, isto é, são gerados imediatamente após suas próprias atividades, caso contrário, não há efetividade na aplicação desses indicadores. Os EPI, por sua vez, podem ser aplicados abrangentemente e fornecem um escopo amplo de análise e planejamento, considerando fatores sociais, econômicos, energéticos, ambientais e materiais para uma maior variedade de casos (XU et al., 2024).

5. Ferramentas de Melhoria de Processo

5.1. Lean Manufacturing

Lean Manufacturing (LM) é uma ferramenta adotada por muitas empresas no início deste século, consistindo na rapidez de resposta e no menor custo envolvido na fabricação de um produto, de forma que as demandas do cliente sejam atendidas, gerando a menor quantidade possível de resíduos. Surgida no Japão, após a Segunda Guerra Mundial, a necessidade de utilização de fábricas parcialmente destruídas e com muito menos recursos levaram ao desenvolvimento do LM, considerado uma abordagem de processo que acopla os princípios que levaram o Japão a se reconstruir e conquistar uma posição sólida no mercado manufatureiro global (BHAMU & SINGH, 2014).

Alguns dos princípios de LM incluem a grande variedade de produtos com poucos defeitos, a integração de desenvolvimento de produtos, gestão da cadeia de suprimentos e da operação fabril, produzir mais com menos, nivelar a escala de produção, maximizar a capacidade e minimizar o estoque, agilizar a produção, mantendo e até aumentando a sua qualidade. Ressalta-se que o conceito de LM ainda está evoluindo e, portanto, sua abrangência também (BHAMU & SINGH, 2014).

5.2. Six Sigma

Six Sigma é uma estratégia de negócios e metodologia sistemática focada em superar defeitos fundamentais de um processo e promover a melhora contínua e ganhos consideráveis na qualidade de produção e na satisfação dos clientes. Profundamente

relacionada à organização estatística de um processo para uma avaliação coerente das operações, a palavra "sigma", em seu nome, se refere à letra grega usada para denotar o desvio padrão de uma população numa distribuição normal, com formato de sino. Quanto mais estreita for a curva, mais acertos há dentro da produção. Dentro dos níveis destacados pelo método, pode-se chegar até seis ("six") sigma, quando há apenas 3,4 defeitos por milhão de oportunidades, isto é, uma capacidade de acertos de 99,9997% por parte do processo (PATEL e DESAI, 2018).

Tal conceito foi proposto pela Motorola e indica a razão entre a média de uma medida da qualidade do processo e o limite de especificação mais próximo para a sua operação, que deve ser de pelo menos seis vezes o desvio padrão. Six Sigma domina a tomada de decisões, a partir dos dados estatísticos inferidos, em busca da assertividade quanto ao atendimento às demandas dos clientes e, ao mesmo tempo, quanto à praticidade de operação da fábrica (PATEL e DESAI, 2018).

A metodologia seguida pelo Six Sigma é definida como DMAIC (da sigla, em inglês, para "Defining", "Measuring", "Analysing", "Improvement" e "Control" - "Definição", "Medida", "Análise", "Melhora" e "Controle"), consistindo em identificar um problema, medir o desempenho do processo quanto a tal situação e coletar dados referentes, analisar e identificar as causas para o problema, implementar novas alternativas que propõem a melhora do processo e garantir o prosseguimento das novas condições atingidas, em caso favorável à eficiência do processo, evitando a os antigos problemas de se tornarem recorrentes (SAKIB et al., 2025).

5.3. Lean Six Sigma

Surgido como uma fusão entre as técnicas de Lean Manufacturing e Six Sigma, suas atribuições seguem a mesma tendência: ao passo que LM propõe a redução dos resíduos gerados pela produção e a eficiência operacional, Six Sigma integra o controle de processos baseado na análise estatística e a visão de atendimento às demandas do cliente como foco. Esta técnica deve ser abordada em conjunto a técnicas de monitoramento e assessoramento da sustentabilidade de processos para continuar com operações comprometidas com o meio-ambiente (SAKIB et al., 2025).

5.4. Kaizen

Assim como LM, Kaizen é tido como uma filosofia por muitos, tendo seu significado embutido no nome: KAI ("mudança") e ZEN ("melhorar"), se estendendo ao ambiente familiar, ao trabalho e às atividades cotidianas. Destaca-se a necessidade de continuidade na melhoria das atividades, precisando-se de "pessoas Kaizen" para "indústrias Kaizen" existirem. A liderança ativa e a criatividade de reinvenção das práticas adotadas, visando-se a melhoria e a otimização da produção são pilares desta técnica, adotada em processos industriais, além de se manter a organização do processo sem investimentos significativos (CARNEIRO et al., 2024).

5.5. PDCA

O ciclo PDCA (Plan-Do-Check-Act) é baseado na otimização contínua e de aprendizado organizacional a partir de ações tomadas durante o ciclo de vida de um processo, respondendo, também, às influências externas, sendo de grande valia à implementação e à estabilização operacional através de um sistema iterativo e sólido de análise de dados (SELVI et al., 2025).

Os estágios de planejamento (Plan) envolvem a identificação do problema e a proposição de possíveis soluções, que seguem para os testes (Do) em que se observa a resposta fornecida após a sua implementação em uma escala limitada. Averigua-se, então, os resultados (Check), comparando-os com alvos pré-estabelecidos, julgando sua efetividade. A última fase (Act) se caracteriza pela implementação do que foi aprendido/determinado para aprimoração das práticas já existentes e continuidade padronizada do processo (SELVI et al., 2025).

5.6. Mapeamento de Processos

O mapeamento de processos é uma ferramenta bem estabelecida para a melhoria de um processo, se destacando por fornecer uma visão tão ampla quanto possível, apresentando os gargalos presentes para futura correção/otimização. A tendência dos processos atuais serem cada vez mais heterogêneos, complexos e flexíveis ameaça esta técnica quanto à sua efetividade. Uma boa característica, porém, é a facilidade de se integrar outras técnicas ao mapeamento dos processos, provendo-o de capacidade de representação fiel e com grande amparo informacional (TERIETE et al., 2026).

CONCLUSÃO

Com base na análise realizada, conclui-se que a Produção mais Limpa demonstra uma estratégia eficiente para tornar os processos industriais mais sustentáveis e competitivos. No setor metalmecânico, sua aplicação à pintura eletrostática representa resultados satisfatórios ao reduzir desperdícios de matéria-prima, reaproveitar resíduos, melhorar o consumo energético e elevar a qualidade final dos produtos. Além dos ganhos no âmbito ambiental, observam-se benefícios econômicos importantes, como a redução de custos operacionais, aumento da produtividade e menor necessidade de retrabalho. A

utilização de ferramentas de gestão e melhoria contínua reforça ainda mais esses resultados, permitindo maior controle dos processos e melhor desempenho organizacional.

Dessa forma, a união entre Produção mais Limpa e pintura eletrostática evidencia-se uma alternativa viável e estratégica para empresas que exploram o crescimento sustentável, responsabilidade ambiental e maior competitividade no mercado atual.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é resultado parcial de um projeto de extensão voltado à otimização de processos em uma indústria de pintura eletrostática, realizado no âmbito do Departamento de Engenharia Química da Universidade Estadual de Maringá (DEQ/UEM). Os autores agradecem a todos os envolvidos na elaboração do projeto e deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, J. C. G et al. Introduzindo práticas de produção mais limpa em sistemas de gestão ambiental certificáveis: uma proposta prática. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 06, n. 03, jul/dez. Rio de Janeiro, 2001

BHAMU, J.; SINGH SANGWAN, K. Lean manufacturing: literature review and research issues. International Journal of Operations & Production Management, v. 34, n. 7, p. 876–940, jul. 2014.

BOER, J., & BLAGA, P. “Innovative method to reduce process costs in the field of electrostatic powder painting”, Procedia Manufacturing, vol.46, pp.44-48, 2020.

CARNEIRO, F. et al. Enhancing Higher Education Through Kaizen 4.0: Bridging Human and Artificial Intelligence Through Kaizen Methodologies. Lecture notes in management and industrial engineering, p. 110–122, 1 jan. 2025.

DRUMOND, T. A. P. Aplicação de técnicas de produção sustentável no processo de pintura automotiva. 2013. 180 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

FARIA, H. O. Processo de pintura utilizando tintas em pó. 2021. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de São João del-Rei, Ouro Branco - MG, 2021.

FERNANDES, J. L. et al. Um estudo da produção mais limpa na gestão ambiental. Revista Augustus, Rio de Janeiro, v. 20, n. 39, p. 52-64, jan./jun. 2015.

FU, J. et al. Powder coating recycling and environmental efficiency in industrial applications. Journal of Coatings Technology Research, 2011.

International Organization for Standardization. Environmental Management - Environmental performance evaluation - Guidelines. ISO 14031:2021. Disponível em: https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:14031:ed-3:v1:en.

KHAN, M. I. et al. Evaluation of powder coating efficiency and particulate emission reduction. Surface Coatings International, 2012.

LIMA et al.. A quarta revolução industrial sob o tripé da sustentabilidade. Semioses: Inovação, Desenvolvimento e Sustentabilidade, Rio de Janeiro, v. 13, n. 3, p. 76-86, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.15202/1981996x.2019v13n3p76-86.

PAPAMICHAEL, I. et al. Existing tools used in the framework of environmental performance. Sustainable Chemistry and Pharmacy, v. 32, p. 101026, maio 2023.

PATEL, M.; DESAI, D. A. Critical review and analysis of measuring the success of Six Sigma implementation in manufacturing sector. International Journal of Quality & Reliability Management, v. 35, n. 8, p. 1519–1545, 3 set. 2018.

PERNAMBUCO. Secretaria de Educação e Esportes. Tecnologia e Produção Limpa: material de apoio à ação docente. Pernambuco, 2021.

PRASAD, R.; McGINITY, T.; WILLIAMS III, J. Transfer efficiency improvements in electrostatic powder coating systems. Journal of Industrial Finishing, 2016.

SAKIB, M. N.; KAWSAR, M.; BITHEE, M. M. Continuous improvement through Lean Six Sigma: a systematic literature review and bibliometric analysis. International Journal of Lean Six Sigma, 14 mar. 2025.

SELVI, E. et al. Strategic Operational Synergy: A Systematic Review of POAC-PDCA Integration for Enhancing Organizational Agility, v.4, n.2, p. 215-231, dez. 2025.

SILVA, G. O.; NOVAIS, K. E. A.; NEVES, F. F. Proposição da produção mais limpa como instrumento de sustentabilidade. In: SIMPÓSIO DE TECNOLOGIA DA FATEC SERTÃOZINHO, 5. (SITEFA), 2022, Sertãozinho.

SOUSA et al., Reaproveitamento de resíduos da pintura eletrostática e seus impactos ambientais: uma revisão bibliográfica. In: XIII SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 13., João Pessoa, 2025.

TERIETE, T. et al. Combining value stream mapping and process mining in production: a systematic literature review. Discover Applied Sciences, v. 8, n. 3, 21 fev. 2026.

UNEP – United Nations Environment Programme. Cleaner Production Assessment in Industries. Paris, 2002.

VIEIRA, L. C.; AMARAL, F. G. Barriers and strategies applying Cleaner Production: a systematic review. Journal of Cleaner Production, [S. l.], v. 113, p. 5-16, 2016. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.034.

WERNER, E. M.; BACARJI, A. G.; HALL, R. J. Produção mais limpa: conceitos e definições metodológicas. 2011. Trabalho apresentado no Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia (SEGeT), 2011.

XU, C. et al. Cleaner production evaluation system for textile industry: An empirical study from LCA perspectives. Science of The Total Environment, v. 913, p. 169632–169632, 1 jan. 2024.