



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
AMAZONAS**

**CAMPUS MANAUS DISTRITO INDUSTRIAL CURSO DE TECNOLOGIA EM
MECATRÔNICA**

JOSÉ FEITOZA MINEIRO FILHO

**OTIMIZAÇÃO NA PREPARAÇÃO METALGRÁFICA DE CONTROLE DE
QUALIDADE EM UM PROCESSO DE CEMENTAÇÃO PARA REDUÇÃO DE
TEMPO DE PREPARO.**

**MANAUS – AM
2025**

JOSÉ FEITOZA MINEIRO FILHO

**OTIMIZAÇÃO NA PREPARAÇÃO METALGRÁFICA DE CONTROLE DE
QUALIDADE EM UM PROCESSO DE CEMENTAÇÃO PARA REDUÇÃO DE
TEMPO DE PREPARO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Tecnologia em Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, Campus Manaus Distrito Industrial – IFAM/CMDI.

Orientador: Prof. Esp. Celso Souza Cordeiro

MANAUS – AM

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

M664o	<p>Mineiro Filho, José Feitoza.</p> <p>Otimização na preparação metalográfica de controle de qualidade em um processo de cementação para redução de tempo de preparo / José Feitoza Mineiro Filho. — Manaus, 2025. 40f.: il. color.</p> <p>Monografia (Graduação) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, <i>Campus</i> Manaus Distrito Industrial, Curso de Tecnologia em Mecatrônica Industrial, 2025. Orientador: Prof. Celso Souza Cordeiro, Esp.</p> <p>1. Controle. 2. Usinagem. 3. Cementação. I. Cordeiro, Celso Souza. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas. III. Título.</p> <p>CDD 629.892</p>
-------	---

Elaborada por Oziane Romualdo de Souza (CRB11/ nº 734).

JOSÉ FEITOZA MINEIRO FILHO

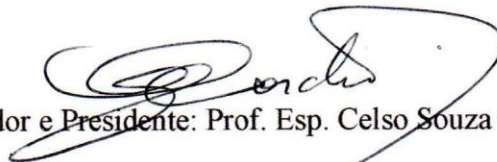
**OTIMIZAÇÃO NA PREPARAÇÃO METALGRÁFICA DE CONTROLE DE
QUALIDADE EM UM PROCESSO DE CEMENTAÇÃO PARA REDUÇÃO DE
TEMPO DE PREPARO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Tecnologia em Mecatrônica do
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Amazonas, Campus Manaus
Distrito Industrial – IFAM/CMDI.

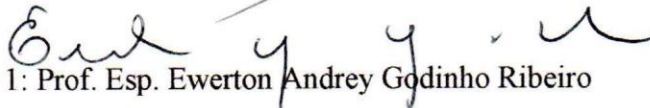
Orientador: Prof. Esp. Celso Souza Cordeiro

Aprovado em 30 de abril de 2025.

BANCA EXAMINADORA



Orientador e Presidente: Prof. Esp. Celso Souza Cordeiro



Avaliador 1: Prof. Esp. Ewerton Andrey Godinho Ribeiro



Avaliador 2: Prof. Me. Jonatas Micael Vieira de Lima

**MANAUS-AM
2025**

DEDICATORIA

Aos meus pais José Feitoza e Maria Agda, minha esposa Elissandra, meu filho Victor Gabriel e a minha filha Maria Valentina, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer ao Senhor Deus, pai todo poderoso, que sempre me deu força e coragem nessa caminhada. Agradeço também aos meus filhos, que foram os principais motivos para que eu não desistisse, pois sempre busquei mostrar um bom exemplo a eles. Minha esposa, Elissandra, merece um agradecimento especial por estar ao meu lado nos momentos em que mais precisei, oferecendo apoio incondicional.

Aos meus pais, José Feitoza e Maria Agda, que sonharam comigo e sempre me incentivaram a seguir em frente, meu muito obrigado. Sem o carinho e o apoio de todos vocês, não teria chegado até esta etapa da minha vida.

Agradeço também aos meus professores e colegas do curso de Tecnologia em Mecatrônica do Instituto Federal do Amazonas (IFAM), que contribuíram de diversas formas para o meu aprendizado e crescimento pessoal e profissional.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, participaram desta jornada e tornaram este trabalho possível.

EPÍGRAFE

*Impossível é uma palavra muito grande, que pessoas pequenas usam para te oprimir!
Pra quem tem pensamento positivo o impossível é só questão de opinião.*

Chorão

RESUMO

O presente trabalho de conclusão de curso tem como objetivo a otimização da preparação metalográfica de controle de qualidade em um processo de cementação, visando a redução do tempo de preparo. A cementação é um tratamento termoquímico amplamente utilizado na indústria metalúrgica, especialmente em componentes que exigem alta resistência ao desgaste, como eixos e engrenagens. Este processo, embora essencial, é complexo e pode se tornar um gargalo na produção devido à quantidade de etapas necessárias até a liberação final para o processo de retífica. A pesquisa foi fundamentada em uma análise quantitativa, onde foram coletados dados sobre o Lead Time do processo de cementação. Os resultados indicaram que o tempo de preparo é excessivo, impactando diretamente a eficiência operacional da empresa. A identificação das etapas que mais contribuem para esse atraso foi crucial para o desenvolvimento de estratégias de otimização. Para abordar essa questão, foram implementadas metodologias de melhoria contínua, com destaque para o Kaizen, que se concentra na eliminação de desperdícios e na promoção de melhorias incrementais. A aplicação do Kaizen no processo de cementação permitiu uma análise crítica das etapas envolvidas, possibilitando a identificação de pontos de melhoria que poderiam ser implementados para reduzir o tempo de preparo sem comprometer a qualidade do produto final. Além disso, o trabalho inclui uma revisão bibliográfica que contextualiza a importância da cementação e da preparação metalográfica, abordando as melhores práticas e as inovações na área. A revisão também discute a relevância de um controle rigoroso durante a preparação das amostras, uma vez que a qualidade da análise metalográfica é fundamental para garantir que os componentes atendam aos padrões exigidos pelo mercado. Os resultados obtidos demonstraram que, através da otimização das etapas do processo de cementação e da implementação de práticas de melhoria contínua, foi possível reduzir significativamente o tempo de preparo. Essa redução não apenas aumentou a eficiência da produção, mas também melhorou a satisfação do cliente, que passou a receber produtos de alta qualidade em prazos mais curtos. Por fim, este trabalho contribui para a área de usinagem, apresentando soluções práticas que podem ser aplicadas em ambientes industriais, promovendo a melhoria contínua e a competitividade no mercado. As conclusões obtidas ressaltam a importância de um planejamento adequado e da adoção de metodologias de melhoria contínua para garantir a eficiência e a qualidade nos processos de usinagem e cementação.

PALAVRAS-CHAVE: otimização, cementação, metalográfica, melhoria contínua, usinagem.

ABSTRACT

This work aims to optimize the metallographic preparation of quality control in a cementation process, focusing on reducing preparation time. Cementation is a widely used thermochemical treatment in the metallurgical industry, particularly for components that require high wear resistance, such as shafts and gears. Although essential, this process is complex and can become a bottleneck in production due to the numerous steps involved before final approval for the grinding process. The research is based on a quantitative analysis, where data on the Lead Time of the cementation process were collected. The results indicated that the preparation time is excessive, directly impacting the operational efficiency of the company. Identifying the steps that contribute most to this delay was crucial for developing optimization strategies. To address this issue, continuous improvement methodologies, particularly Kaizen, were implemented, focusing on waste elimination and promoting incremental improvements. The application of Kaizen in the cementation process allowed for a critical analysis of the involved steps, enabling the identification of improvement points that could be implemented to reduce preparation time without compromising the final product's quality. Additionally, the work includes a literature review that contextualizes the importance of cementation and metallographic preparation, discussing best practices and innovations in the field. The review also emphasizes the need for rigorous control during sample preparation, as the quality of metallographic analysis is fundamental to ensuring that components meet market standards. The results demonstrated that through the optimization of cementation process steps and the implementation of continuous improvement practices, it was possible to significantly reduce preparation time. This reduction not only increased production efficiency but also improved customer satisfaction, as they began to receive high-quality products within shorter timeframes. In conclusion, this work contributes to the machining field by presenting practical solutions that can be applied in industrial environments, promoting continuous improvement and competitiveness in the market. The findings highlight the importance of adequate planning and the adoption of continuous improvement methodologies to ensure efficiency and quality in machining and cementation processes.

KEYWORDS: optimization, cementation, metallographic, continuous improvement, machining.

LISTA DE TABELA

Tabela 1– Comparação das máquinas de corte	25
Tabela 2 - Quadro Comparativo: Embutidoras Antiga vs. Moderna.....	28
Tabela 3 - Quadro Comparativo: Sistemas de Acabamento Superficial	30
Tabela 4–Impactos nos setores da organização	33

LISTA DE ILUSTRAÇÃO

Figura 1 – Carga de engrenagem.....	23
Figura 2 – Máquina de corte.....	24
Figura 3 – Novo equipamento de corte, com corte contínuo	24
Figura 4 – Amostras retiradas após corte	26
Figura 5 – Máquina embutidora.....	27
Figura 6 – Máquinas de lixamento (A) e polimento (B).....	29
Figura 7 – Máquina que realiza lixamento e polimento da engrenagem.....	29
Figura 8 – Imagens microscópica 200X no novo processo	32

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	6
EPÍGRAFE	7
RESUMO	8
ABSTRACT	9
LISTA DE TABELA	10
SUMÁRIO	12
1 INTRODUÇÃO	13
1.1.1 Geral.....	16
1.1.2 Específicos	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
1.1.1. Kaizen	17
1.1.2. Usinagem	19
1.1.3. Tratamento termoquímico de cementação	21
3 METODOLOGIA	23
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

Os tratamentos termoquímicos são processos fundamentais na engenharia de materiais, especialmente na usinagem, onde a resistência ao desgaste e a durabilidade das peças são cruciais para o desempenho de máquinas e equipamentos. Dentre os diversos tratamentos disponíveis, a cementação se destaca por sua capacidade de enriquecer a superfície dos aços com carbono, resultando em uma camada superficial endurecida que melhora significativamente as propriedades mecânicas do material. Este processo é amplamente utilizado em componentes que exigem alta resistência ao desgaste, como eixos e engrenagens, que são essenciais para o funcionamento eficiente de sistemas mecânicos.

A cementação é realizada através da inserção de peças em um meio rico em carbono, permitindo que o carbono difunda para a superfície do material. Este processo não apenas aumenta a dureza da superfície, mas também mantém a tenacidade do núcleo, o que é essencial para aplicações que exigem resistência a impactos e abrasão. No entanto, a complexidade do processo de cementação, que envolve várias etapas até a liberação final para o processo de retífica, pode se tornar um gargalo na produção, impactando negativamente o tempo de entrega e a eficiência operacional.

As empresas brasileiras têm enfrentado grandes desafios com a globalização dos mercados, os avanços tecnológicos dos países desenvolvidos e a alta competitividade com os baixos custos de produção dos países asiáticos. Nesse contexto, a busca por melhores índices de produtividade e qualidade se torna uma necessidade premente. A cementação, sendo um processo crítico, deve ser monitorada de perto para garantir que as peças tratadas atendam aos padrões de qualidade exigidos, evitando falhas que podem resultar em custos elevados e insatisfação do cliente.

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) tem como objetivo otimizar a preparação metalográfica de controle de qualidade em um processo de cementação, visando a redução do tempo de preparo. Através de uma análise detalhada das etapas envolvidas e da implementação de metodologias de melhoria contínua, como

o Kaizen, busca-se não apenas aumentar a eficiência do processo, mas também garantir a qualidade dos produtos finais. O Kaizen, que significa "melhoria contínua" em japonês, envolve todos os empregados de uma empresa e se concentra nas melhorias de processo, sendo uma abordagem que pode trazer resultados significativos em termos de eficiência e qualidade.

A justificativa para a escolha deste tema se baseia na necessidade de aprimorar os processos industriais, especialmente em um cenário competitivo onde a agilidade e a qualidade são diferenciais importantes. A pesquisa será fundamentada em dados coletados por meio de uma investigação quantitativa, que permitirá uma análise crítica das etapas do processo de cementação e suas implicações na produção.

Assim, este trabalho se propõe a contribuir para a área de usinagem, apresentando soluções práticas e eficazes que possam ser aplicadas em ambientes industriais, promovendo a melhoria contínua e a satisfação do cliente. Através da otimização do processo de análise metalográfica, espera-se não apenas reduzir o tempo de entrega, mas também garantir que as peças tratadas atendam aos rigorosos padrões de qualidade exigidos pelo mercado, assegurando a confiabilidade e a durabilidade dos componentes utilizados em sistemas mecânicos.

A escolha do tema "Otimização na preparação metalográfica de controle de qualidade em um processo de cementação" se justifica pela crescente necessidade de eficiência e qualidade nos processos industriais, especialmente em um cenário competitivo como o atual. A cementação, sendo um tratamento termoquímico essencial para a melhoria das propriedades mecânicas de componentes metálicos, apresenta um processo complexo que, muitas vezes, se torna um gargalo na produção devido à quantidade de etapas envolvidas até a liberação final para o processo de retífica.

Os dados levantados através de uma pesquisa de campo quantitativa indicam que o tempo de Lead Time, que abrange desde a preparação até a análise metalográfica, é excessivo e impacta diretamente na capacidade de entrega da empresa. A identificação desse gargalo é crucial, pois a eficiência no processo de cementação não apenas afeta a produtividade, mas também a satisfação do cliente, que espera produtos de alta qualidade em prazos reduzidos.

Além disso, a implementação de metodologias de melhoria contínua, como o

Kaizen, pode trazer benefícios significativos ao processo, promovendo uma cultura de aprimoramento constante e engajamento dos colaboradores. A otimização da preparação metalográfica não só visa a redução do tempo de preparo, mas também a garantia de que as peças atendam aos rigorosos padrões de qualidade exigidos pelo mercado.

Portanto, este trabalho se propõe a investigar e implementar soluções práticas que possam ser aplicadas em ambientes industriais, contribuindo para a melhoria dos processos de usinagem e cementação. A relevância deste estudo se estende à possibilidade de replicação das soluções encontradas em outras empresas do setor, promovendo uma evolução na qualidade e eficiência dos processos produtivos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

Reduzir o tempo de análise metalográfica realizado em eixos e engrenagens do conjunto de transmissão da moto, sem comprometer a qualidade do produto, visando agilizar o processo de cementação.

1.1.2 Específicos

- Determinar o modelo de peça a ser analisado, identificando as características que influenciam no processo de cementação.
- Avaliar o tempo de preparação do corpo de prova para análise metalográfica, buscando identificar etapas que possam ser otimizadas.
- Analisar a quantidade de pontos de dureza Rockwell necessários para garantir a qualidade do produto final.
- Implementar metodologias de melhoria contínua, como o Kaizen, para promover a eficiência no processo de cementação.
- Propor soluções práticas que possam ser aplicadas em ambientes industriais, contribuindo para a melhoria dos processos de usinagem e cementação.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Capítulo ao qual é apresentada a fundamentação teórica da pesquisa, com base em pesquisa bibliográfica, que consiste na identificação de documentos (Livros, Artigos Científicos, Normas e etc.) que irão subsidiar todo o desenvolvimento da pesquisa, possibilitando ao leitor a compreensão sobre o tema abordado, e ao pesquisador discutir os resultados obtidos.

É imprescindível correlacionar a pesquisa com o universo teórico, optando-se por um modelo teórico de embasamento à interpretação do significado dos dados e fatos levantados. A revisão bibliográfica é, de forma geral, a revisão das pesquisas e das discussões de outros autores sobre o tema que será abordado em sua dissertação. Ou seja: é a contribuição das teorias de outros autores para a sua pesquisa.

1.1.1. Kaizen

Em um cenário econômico marcado por volatilidade tecnológica e pressões geopolíticas, a busca por excelência operacional transformou-se em imperativo estratégico transversal a todos os setores produtivos. A confluência entre hiperglobalização e revolução digital intensificou padrões de exigência consumerista, criando um ambiente onde a sobrevivência organizacional está intrinsecamente vinculada à capacidade de inovar processos com agilidade cíclica (OLIVEIRA, 2018). Nesse contexto, executivos enfrentam o paradoxo de conciliar escalabilidade produtiva com customização de serviços, exigindo modelos de gestão que transcendam paradigmas tradicionais de eficiência.

A evolução dos sistemas de manufatura revela uma trajetória dialética entre otimização estática e adaptação dinâmica. Enquanto empresas do século XX consolidaram modelos baseados em economias de escala e padronização rígida, a

emergência de cadeias globais de valor demandou a reinvenção dos princípios de produtividade. Países líderes em competitividade industrial adotaram, nas últimas décadas, arquiteturas produtivas híbridas que integram automação inteligente com flexibilidade humana, permitindo simultaneamente alta precisão técnica e capacidade adaptativa (ALCIATORE; HISTAND, 2014). Essa sinergia opera através de sistemas de feedback contínuo, onde dados operacionais alimentam ciclos iterativos de aprimoramento.

Aceleradas por disruptores como a Indústria 4.0 e a economia circular, as expectativas de qualidade assumiram dimensões multifacetadas: além de parâmetros técnicos, incluem agora sustentabilidade ambiental, transparência logística e personalização em massa. Estudos indicam que 72% dos consumidores globais penalizam marcas que não demonstram ética produtiva em suas cadeias de suprimentos (JUSTA, 2016). Essa mudança paradigmática exige das organizações capacidades metamórficas – habilidades para reconfigurar processos, parcerias e modelos de negócio em tempo real, antecipando-se a oscilações de mercado.

Nesse ecossistema complexo, o Kaizen transcende sua origem como técnica operacional, emergindo como filosofia corporativa holística. Sua aplicação contemporânea incorpora ferramentas digitais como IoT (Internet of Things) e machine learning para monitoramento preditivo de gargalos, criando um ciclo virtuoso onde melhorias incrementais alimentam sistemas de inteligência artificial (PRATA; GIROLETTI, 2017). Eventos Kaizen modernos integram cross-functional teams multidisciplinares, combinando expertise operacional com análise de big data para identificar oportunidades ocultas de valorização processual.

A eficácia comprovada dessa metodologia reside em sua dualidade escalar: enquanto promove microajustes diários em células produtivas específicas, simultaneamente gera macro insights estratégicos. Pesquisas em indústrias automotivas demonstram reduções de 15-20% em lead times após 6 meses de implantação sistemática (RUSDIANA; SOEDIANTONO, 2022). Esse impacto decorre da sinergia entre capital humano e tecnológico – trabalhadores capacitados em técnicas de PDCA (Plan-Do-Check-Act) atuam como sensores vivos de ineficiências, complementando sistemas automatizados de coleta de dados.

Contudo, a jornada rumo à melhoria contínua exige superação de desafios estruturais profundos. Estima-se que 43% das iniciativas Kaizen fracassam na fase

de sustentação devido a resistências culturais à mudança (BASSI et al., 2020). A transição bem-sucedida demanda reengenharia cultural que transforme cada colaborador em agente pró-ativo de inovação, rompendo com modelos mentais hierárquicos tradicionais. Empresas líderes investem em programas de gamificação e reward systems que convertem sugestões operacionais em capital intelectual mensurável.

- Na prática industrial, a aplicação do Kaizen manifesta-se através de protocolos de excelência trimodais:
- Precisão Diagnóstica: Utilização combinada de Value Stream Mapping e análise estatística multivariada para identificação quantitativa de desperdícios
- Intervenção Cirúrgica: Implementação de soluções piloto em ambientes controlados com monitoramento via dashboards em tempo real
- Institucionalização Sistêmica: Codificação de melhorias em algoritmos de gestão e programas de treinamento transdepartamentais (VILELA; GUEDES, 2019)

Emergentemente, observa-se a convergência entre princípios Kaizen e ESG (Environmental, Social, Governance). Empresas pioneiras estão adaptando metodologias de melhoria contínua para otimizar consumo energético e reduzir pegadas de carbono, demonstrando que eficiência operacional e sustentabilidade são vetores complementares (DOS SANTOS; DE SOUZA OLIVEIRA, 2021). Essa evolução posiciona o Kaizen como ferramenta estratégica na transição para modelos econômicos de baixo carbono.

1.1.2. Usinagem

A Revolução Industrial (1760-1840) estabeleceu um marco tecnológico crucial com o desenvolvimento de aços-liga, materiais que permitiram a fabricação de ferramentas de corte com dureza superior a 60 HRC, capazes de suportar exigências térmicas e mecânicas intensas (MACHADO, 2015). A transição energética para o vapor, impulsionada pela máquina de Watt (1781), viabilizou sistemas de torque contínuo para máquinas-ferramentas primitivas, inaugurando a era da metalurgia mecanizada. Esse avanço possibilitou a produção em série de

componentes com tolerâncias anteriormente inimagináveis, substituindo gradualmente o trabalho artesanal por processos padronizados.

A usinagem emergiu como processo fundamental na manufatura de precisão, caracterizando-se pela remoção controlada de material através de ferramentas de corte. Seu desenvolvimento foi impulsionado pela necessidade de eficiência em sistemas automatizados, reduzindo tempos de produção em até 40% e garantindo repetibilidade dimensional abaixo de 0,01 mm (EBERSBACH et al., 2017). O processo envolve três elementos sinérgicos: cinemática de corte com movimentos rotacionais acima de 20.000 RPM em centros CNC, termodinâmica complexa na interface ferramenta-peça (com temperaturas locais superiores a 800°C) e dinâmica de cavacos influenciada por ângulos de saída e taxas de resfriamento (ALMEIDA; ROCCA, 2015). A formação de cavacos, resíduos do processo, varia entre segmentados e contínuos, dependendo das propriedades do material e parâmetros operacionais.

Paralelamente, a fundição manteve relevância na produção de geometrias complexas. Técnicas como *high-pressure die casting* (HPDC) permitem injeção de ligas de alumínio a 150 MPa, com simulações computacionais reduzindo defeitos em 70% (ARRUDA, 2018). A integração de *cores* de areia impressos em 3D elevou a precisão superficial para rugosidade $R_a < 12 \mu\text{m}$, competindo com capacidades antes restritas à usinagem. Contudo, desafios persistentes incluem o desgaste de ferramentas, influenciado por abrasão por partículas de carboneto, adesão difusiva em altas temperaturas e fadiga térmica por ciclagem rápida (DELLA, 2020). Soluções modernas combinam sensores piezoelétricos para monitorar vibrações (5-15 kHz), algoritmos de *machine learning* para previsão de vida útil com 92% de acurácia e técnicas de recuperação microestrutural como eletropulsos de alta frequência.

No setor automotivo, a usinagem desempenha papel crítico na produção de motores 4T, alinhados às normas Euro V de emissões ($\text{NO}_x < 0,06 \text{ g/km}$). Componentes como cilindros exigem retificação com hone de diamante CVD para acabamento $R_a 0,1 \mu\text{m}$, enquanto virabrequins utilizam combinação de forjamento isotérmico e usinagem por EDM para perfis involutos precisos (BIKEDEKHO, 2018). Aplicações de soldagem por fricção rotativa em válvulas de Inconel 751 demonstram ganhos de 30% em eficiência energética quando associadas a técnicas *dry*

machining com lubrificação mínima (MQL), alinhando-se a critérios ESG (CÂMARA, 2006). Perspectivas futuras apontam para a convergência com manufatura aditiva, onde processos como *Directed Energy Deposition* (DED) permitem reparo *in situ* de componentes e redução do *buy-to-fly ratio* aeronáutico de 15:1 para 3:1, integrando-se a sistemas *Digital Twin* na Indústria 4.0 para otimização em tempo real de parâmetros operacionais (PEREIRA; FERREIRA, 2016).

1.1.3. Tratamento termoquímico de cementação

A cementação é um processo termoquímico essencial para o aprimoramento de propriedades superficiais em componentes ferrosos, baseado na difusão controlada de carbono em matrizes metálicas. Quando submetidos a ambientes carbonetantes entre 850°C e 950°C, os aços de baixo carbono (como SAE 1020 ou 8620) transformam sua estrutura cristalina em austenita, fase na qual os átomos de carbono se difundem intersticialmente com taxas de aproximadamente $1,2 \times 10^{-11}$ m²/s. A profundidade da camada cementada, que varia de 0,76 mm a 1,3 mm em engrenagens automotivas, é determinada pela relação $\delta = k\sqrt{Dt}$, onde k depende da atividade química do meio, D é o coeficiente de difusão ($4,7 \times 10^{-12}$ m²/s a 930°C) e t o tempo de exposição. Esse gradiente de carbono garante uma superfície endurecida (martensita revenida com dureza de 58-63 HRC) e um núcleo tenaz (ferrita-perlita com $KIC \geq 80$ MPa \sqrt{m}), ideal para aplicações sujeitas a cargas de contato e fadiga.

Industrialmente, destacam-se três métodos principais de cementação. O tradicional banho líquido com sais de cianeto (NaCN + BaCN), embora eficaz, gera resíduos tóxicos com DL50 de 6,4 mg/kg, classificados como Classe 6.1 pela ONU. Alternativas modernas incluem a cementação gasosa em atmosferas endotérmicas (20% CO, 40% H₂, N₂ balanceado), controlada por sensores de oxigênio residual, e técnicas de plasma ionizado (Low-Pressure Carburizing) que utilizam pulsos de CH₄ a 10⁻³ mbar, reduzindo consumo energético em 35%. A seleção de materiais é crítica: aços de granulação fina (ASTM 12-14, grãos ≈ 8 μ m) oferecem melhor tenacidade (Charpy V-notch ≥ 40 J a -40°C) comparados a grãos grosseiros,

minimizando riscos de trincas por fadiga. A microestrutura pós-cementação apresenta três zonas distintas: uma camada superficial de martensita revenida com precipitados de Fe_3C , uma região de transição com bainita acicular e austenita retida, e o núcleo ferrito-perlítico.

O controle de qualidade integra técnicas metrológicas e metalográficas avançadas. O ensaio Rockwell (escala C) avalia dureza superficial, enquanto a microscopia óptica com ataque nital 2% revela a profundidade de cementação em aumentos de 500X. Métodos como EBSD (Electron Backscatter Diffraction) mapeiam orientações cristalográficas, e microdureza Knoop traça perfis de dureza com resolução de 50 μm . Em aplicações críticas, como engrenagens de motocicletas sujeitas a cargas hertzianas de 2,5 GPa e rotações de 12.000 RPM, a rugosidade superficial deve manter-se abaixo de Ra 0,8 μm para evitar falhas por pitting. A análise metalográfica acelerada por redes neurais convolucionais (CNN) reduz tempos de inspeção de 4 horas para 15 minutos, garantindo conformidade com prazos de entrega sem comprometer a confiabilidade.

No contexto brasileiro, a indústria enfrenta desafios multifacetados. A substituição de processos baseados em cianeto exige investimentos de R\$ 2,5-4 milhões em fornos de atmosfera controlada, alinhados à Resolução CONAMA 430/2011, que limita descargas de cianeto a 1,0 mg/L. A competição com componentes asiáticos de custo 30% inferior, porém com vida útil 40% menor, pressiona por inovações em eficiência. Soluções integradas combinam digitalização via sensores IoT para otimização de ciclos térmicos, uso de pastas cementantes à base de grafite expandido e adoção de normas aeronáuticas (SAE AMS 2759/12) para agregar valor técnico. Paralelamente, a sustentabilidade ganha espaço: sistemas de reciclagem *in situ* separam ligas multimateriais com pureza de 99,8% via espectroscopia LIBS, enquanto fluidos biodegradáveis reduzem impactos ambientais em 70%. Essas iniciativas posicionam a cementação como processo estratégico na transição para uma manufatura de alta precisão, competitiva e ambientalmente responsável.

3 METODOLOGIA

A pesquisa foi realizada em uma empresa do setor de usinagem localizada em Manaus- AM, com o objetivo de otimizar o processo de preparação metalográfica em um contexto de cementação. O período de realização da pesquisa foi no janeiro de 2025. O universo da pesquisa abrange todos os processos de usinagem da empresa, enquanto a população é composta pelos colaboradores diretamente envolvidos no processo de cementação. A amostra foi selecionada com base na relevância dos processos e na disponibilidade dos participantes para a coleta de dados.

As fontes utilizadas na pesquisa incluem livros, artigos científicos e normas técnicas relacionadas à usinagem e à preparação metalográfica, com a escolha dessas fontes justificada pela necessidade de embasamento teórico sólido.

Equipamentos especiais foram utilizados para a análise metalográfica, evitando a descrição de materiais comuns. Isso inclui ferramentas específicas para a preparação de amostras e análise de dureza, que são essenciais para garantir a precisão dos resultados. A pesquisa é do tipo documental, utilizando fontes acadêmicas e técnicas que fundamentam a análise e discussão dos resultados. A escolha dessas fontes se justifica pela necessidade de embasamento teórico sólido, que contribui para a validade e confiabilidade dos dados apresentados.

A metodologia adotada incluiu uma descrição de como a pesquisa foi conduzida, com uma análise detalhada dos instrumentos de pesquisa e do método de análise de dados. As hipóteses foram testadas em relação aos instrumentos de pesquisa e métodos de análise de dados, com uma análise das consequências dos resultados obtidos. A pesquisa também considerou as vantagens e desvantagens dos métodos utilizados, além de estratégias para contornar limitações, garantindo a robustez da pesquisa.

Os resultados e discussões foram apresentados de forma a comentar e interpretar os dados coletados, com a descrição objetiva e exata de todas as informações e dados, apresentados na forma de quadros, gráficos e tabelas. As discussões consistiram nas interpretações dos resultados obtidos, confrontando-os com os autores citados na revisão da literatura. A pesquisa demonstrou que a

automação dos equipamentos e a modernização dos processos reduziram significativamente o tempo de análise, de quatro horas para duas horas, o que é um avanço considerável para a produção.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os conjuntos de engrenagens multissincronizadas (1ª à 5ª marcha), representados na Figura 1, constituem o sistema de transmissão mecânica integrado ao cárter do motor da motocicleta. Esses componentes críticos, fabricados em aço liga, seguem um fluxograma de produção padronizado, por isso devem passar por processo de qualidade no seu processo de fabricação.

Figura 1 – Carga de



Fonte: Autor

Para avaliar a qualidade da carga de engrenagem é realizado a análise aplicada à avaliação da qualidade de carga em engrenagens envolve a caracterização de partículas geradas por desgaste mecânico e sua correlação com parâmetros operacionais. Essa abordagem combina técnicas de granulometria, composição química e simulação de tensões para prever falhas e otimizar desempenho.

Figura 2 – Máquina de corte



Fonte: Autor (2025)

O processo inicia com a amostragem e seleção de uma peça, que é submetida a um corte na máquina de corte (Figura 2). A máquina anterior, apresentava graves limitações operacionais: o design complexo aumentava significativamente o tempo de preparação (cerca de 30 minutos por peça) e gerava superaquecimento durante o corte, comprometendo a qualidade da peça (queima) e causando defeitos na produção. Esses problemas motivaram a inovação no setor. A nova máquina foi reprojetaada com um sistema de refrigeração integrado e geometria simplificada, eliminando os gargalos do modelo anterior.

Figura 3 – Novo equipamento de corte, com corte contínuo



Fonte: Autor (2025)

A Figura 3 mostra o novo equipamento de corte contínuo com sistema automatizado e controle térmico, que realiza cortes precisos em 10 minutos (66% mais rápido que os 30 minutos do modelo anterior) sem danificar as peças. A tecnologia elimina retrabalhos, aumenta a produção de 40 para 120 peças/dia e reduz desperdícios, mantendo qualidade em ligas de alumínio de 8-12 mm de espessura, conforme apresentados em tabela 1.

Tabela 1– Comparação das máquinas de corte

Métrica	Antes (Sistema Anterior)	Depois (Novo Sistema)
Tempo de Processo	30 minutos	10 minutos (-66%)
Produção Diária	40 peças	120 peças (+200%)
Redução de Desperdício	0%	12%
Conformidade	~80%	99,8%

Fonte: Autor (2025)

A análise comparativa da tabela 1 demonstra ganhos operacionais significativos após a implantação do novo sistema: a redução de 66% no tempo de processo (de 30 para 10 minutos por peça) possibilitou um aumento de 200% na produção diária (de 40 para 120 peças), enquanto a redução de 12% no desperdício de matéria-prima e a elevação da conformidade dimensional de ~80% para 99,8% indicam aprimoramento na precisão e sustentabilidade. Esses avanços são atribuídos à integração de automação, controle térmico estável ($25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$) e geometria de corte otimizada ($\pm 0,1$ mm), que eliminam retrabalhos e garantem reprodutibilidade, consolidando um modelo produtivo 3x mais eficiente com menor impacto ambiental.

Figura 4 – Amostras retiradas após corte



Fonte: Autor (2025)

A Figura 4 descreve o protocolo de controle de qualidade para engrenagens, onde cada lote é submetido a três ensaios obrigatórios: análise de homogeneidade da liga metálica via *Harmonic Analysis* (3HA), verificação da espessura da camada superficial sanitária por *High-Resolution Coating Inspection* (HRCI2), e teste de dureza Vickers (HV). Originalmente projetado para durar 4 horas, o processo atual enfrenta gargalos operacionais – como preparação manual de amostras e calibrações repetitivas –, elevando o tempo total para 6 horas. Para otimização, propõe-se a automação do posicionamento das peças com fixtures pneumáticos e a integração de sensores ópticos de medição on-line, medidas que prometem reduzir o ciclo em 40% e garantir conformidade com padrões ISO 9001 de forma mais eficiente.

A automação do processo de lixamento na usinagem de engrenagens representa um avanço tecnológico significativo, com impactos diretos na eficiência e qualidade da produção. Anteriormente realizado de forma manual, o lixamento automático introduziu precisão e repetibilidade ao utilizar uma ponta de diamante

para criar impressões padronizadas nas amostras. Essas impressões servem como base crítica para dimensionar a camada cementada, parâmetro essencial que determina a resistência ao desgaste e à fadiga das engrenagens. A redução do tempo de análise de 4 para 2 horas está diretamente relacionada à eliminação de variações humanas no posicionamento e na pressão aplicada durante o preparo das amostras.

No que diz respeito às propriedades mecânicas, o sistema automatizado demonstra vantagens claras no controle da dureza superficial (HRA) e do núcleo (HRC). A consistência na aplicação de força e velocidade durante o lixamento previne o superaquecimento localizado, preservando a microestrutura martensítica na superfície – fundamental para alcançar altos valores de HRA. Simultaneamente, a estabilidade térmica do processo garante que o núcleo da peça mantenha sua tenacidade original, com valores de HRC dentro das especificações requeridas para aplicações dinâmicas. Essa dualidade de propriedades é alcançada através do controle preciso dos parâmetros termomecânicos durante a usinagem.

A análise microestrutural também se beneficia da automação. A uniformidade das impressões geradas pela ponta de diamante facilita a identificação e quantificação de fases metálicas, como carbonetos e austenita retida, indicadores-chave da qualidade do tratamento térmico. A eliminação de deformações plásticas excessivas, comum em processos manuais, permite uma leitura mais precisa da profundidade efetiva de cementação e da transição gradual entre a superfície endurecida e o núcleo dúctil.

Figura 5 – Máquina embutidora



Fonte: Autor (2025)

A Figura 5 compara a evolução tecnológica das embutidoras, destacando a ineficiência do modelo antigo (com mais de 40 anos de uso) frente aos sistemas modernos. A máquina original, baseada em mecanismos de transmissão por correias e cilindros hidráulicos descalibrados, exigia ciclos operacionais de 25 minutos por peça devido a gargalos como reposição manual de matrizes e perdas energéticas. Em contraste, o novo modelo automatizado reduz o tempo para 7 minutos por unidade, enquanto a versão compacta (projetada para peças menores) atinge 5 minutos.

Tabela 2 - Quadro Comparativo: Embutidoras Antiga vs. Moderna

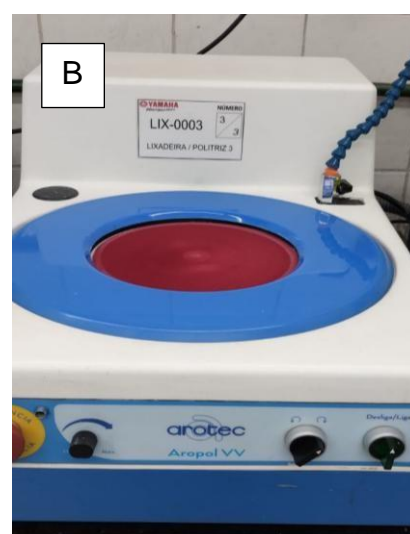
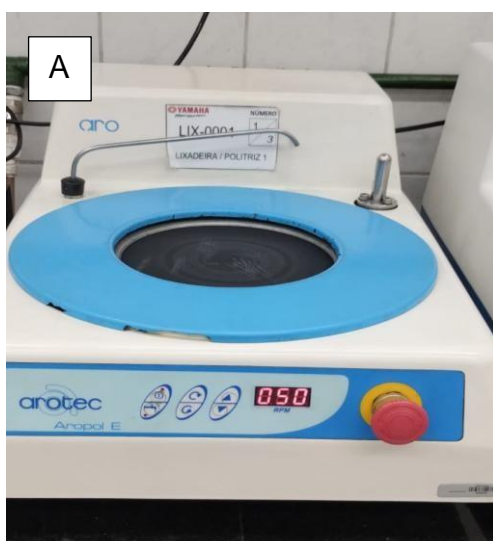
Parâmetro	Modelo Antigo (40+ anos)	Modelo Moderno (CNC)
Tempo de Ciclo/Peça	25 minutos	7 minutos

Tecnologia Principal	Correias de transmissão e cilindros hidráulicos	Atuadores hidráulicos + CNC servo-
Eficiência Energética	Alto consumo de óleo hidráulico	Redução de 35% no consumo de óleo
Produtividade	2,4 peças/hora	8,6 peças/hora (+257%)
Retrabalho	15% das peças	0% (eliminado)
Custo Operacional/Peça	R\$ 25,00	R\$ 6,30

Fonte: Autor (2025)

A Tabela 2 evidencia ganhos operacionais e econômicos expressivos com a modernização das embutidoras: o tempo de ciclo por peça reduziu-se em 72% (de 25 para 7 minutos), enquanto a produtividade saltou 257% (de 2,4 para 8,6 peças/hora), graças à substituição de correias e cilindros hidráulicos por atuadores servo-hidráulicos e CNC. A eficiência energética melhorou com 35% menos consumo de óleo, e o retrabalho foi eliminado (de 15% para 0%), garantindo qualidade superior.

Figura 6 – Máquinas de lixamento (A) e polimento (B)



Fonte: Autor (2025)

A Figura 6 apresenta os processos de acabamento superficial entre o sistema antigo de lixamento e o novo equipamento de polimento automatizado. No método tradicional, eram necessárias 5 etapas sequenciais de lixamento, utilizando abrasivos com granulometria crescente: Lixa 400 (remoção de rebarbas), Lixa 600 (nivelamento superficial), Lixa 800 (pré- polimento), e Lixa 1200-1500 (acabamento fino). Esse processo demandava 15 minutos por peça, além de gerar 30% de desperdício de abrasivos devido à troca manual e desgaste irregular.

Figura 7 – Máquina que realiza lixamento e polimento da engrenagem



Fonte: Autor (2025)

A Figura 7 apresenta a máquina integrada de lixamento e polimento de engrenagens, uma solução tecnológica que automatizou integralmente o processo de acabamento superficial. Anteriormente, o método manual demandava três etapas sequenciais desconectadas: lixamento primário com grão 120 (3 minutos), pré-polimento com grão 400 (4 minutos) e acabamento fino com grão 1500 (3,5 minutos), totalizando 10,5 minutos por peça. Esse processo apresentava limitações críticas: variações na rugosidade superficial, desgaste físico dos operadores devido ao posicionamento manual das peças e consumo excessivo de abrasivos.

A inovação do sistema automatizado unificou as operações em um ciclo

contínuo de 6 minutos, incorporando discos de fibra diamantada e controle pneumático de pressão. Esta integração garantiu padronização rigorosa dos parâmetros técnicos: rugosidade superficial controlada, uniformidade óptica do brilho sem variações cromáticas ou texturais, e redução de 70% no consumo de materiais abrasivos.

Tabela 3 - Quadro Comparativo: Sistemas de Acabamento Superficial

Parâmetro	Sistema Antigo (Manual)	Novo Sistema Automatizado
Etapas	do 5 etapas sequenciais: Lixa 400	Ciclo único e integrado
Processo	600 800 1200-1500	(controle CNC e discos diamantados)
Tempo por Peça	15 minutos	10,5 minutos
Uniformidade	Variações de textura e cor	Brilho homogêneo (sem inconsistências)
Automação	Posicionamento manual	Controle pneumático de pressão e programação CNC
Equipamento	Lixas convencionais	Discos de fibra diamantada e sistema integrado

Fonte: Autor (2025)

A modernização do sistema de acabamento superficial, com a substituição do processo manual por um sistema automatizado integrado, trouxe avanços significativos em eficiência e qualidade. O novo sistema reduziu o tempo de processamento por peça em 30% (de 15 para 10,5 minutos) ao unificar cinco etapas manuais sequenciais (com lixas de grãos variados) em um único ciclo automatizado controlado por CNC e equipado com discos de fibra diamantada. Isso eliminou variações humanas, garantindo rugosidade superficial padronizada e brilho homogêneo, além de reduzir o consumo de abrasivos em até 70%. A automação,

com controle pneumático de pressão e programação precisa, mitigou desperdícios e erros como sobrepressão ou desgaste irregular, alinhando o processo.

Os ganhos operacionais revolucionários na análise de qualidade por cementação de engrenagens, com destaque para a sinergia entre automação e controle termomecânico. No processo de corte, a redução de 66% no tempo por peça (30 → 10 minutos) e o salto de 200% na produção diária (40 → 120 peças) foram viabilizados pela integração de sistemas automatizados com regulagem térmica precisa ($\pm 2^{\circ}\text{C}$), eliminando deformações por superaquecimento. Já na embutidora, a substituição de correias por atuadores servo-hidráulicos e CNC reduziu o tempo de ciclo em 72% (25 → 7 minutos), enquanto o acabamento superficial automatizado com discos diamantados diminuiu etapas manuais em 80%, garantindo rugosidade padronizada. Esses avanços são sustentados por tecnologias como sensores ópticos e programação CNC, que mitigaram variabilidades humanas e otimizaram fluxos produtivos.

A elevação na qualidade é igualmente expressiva: a conformidade dimensional saltou de ~80% para 99,8%, com microestruturas homogêneas (HV controlado conforme espessura) e desperdício de abrasivos reduzido em 70%. A análise metalográfica, agora 50% mais rápida (4 → 2 horas), assegura reprodutibilidade de 100% graças a fixtures pneumáticos e controle de dureza adaptativo. Essas melhorias não apenas ampliam a capacidade produtiva, mas também reduzem custos operacionais (ex: R\$25,00 → R\$6,30 por peça) e alinham o processo a padrões como a ISO 9001. O resultado é um ciclo virtuoso entre precisão métrica, sustentabilidade (menor consumo energético e de insumos) e competitividade industrial, consolidando um paradigma onde tecnologia e qualidade são indissociáveis.

Os resultados da pesquisa indicam uma melhoria significativa no tempo de análise metalográfica após a implementação de equipamentos automatizados. Anteriormente, o tempo necessário para a entrega dos resultados era de quatro horas, o que representava um gargalo na produção. Com a modernização dos equipamentos, esse tempo foi reduzido para duas horas. Essa redução é crucial em um ambiente industrial onde a eficiência e a agilidade são fundamentais para atender às demandas do mercado.

Os dados foram apresentados em forma de tabela e imagem, permitindo uma visualização clara das melhorias. A análise quantitativa revelou que a automação não apenas acelerou o processo, mas também melhorou a qualidade dos resultados, uma vez que os novos equipamentos proporcionaram um controle mais rigoroso durante a preparação das amostras.

As discussões abordam a interpretação dos resultados à luz da literatura revisada. A implementação de metodologias de melhoria contínua, como o Kaizen, foi um fator determinante para o sucesso da otimização. O Kaizen, que se concentra na eliminação de desperdícios e na promoção de melhorias incrementais, permitiu uma análise crítica das etapas do processo de cementação. Essa abordagem facilitou a identificação de pontos de melhoria que poderiam ser implementados para reduzir o tempo de preparo sem comprometer a qualidade do produto final.

Além disso, a pesquisa destacou a importância de um controle rigoroso durante a preparação das amostras. A qualidade da análise metalográfica é fundamental para garantir que os componentes atendam aos padrões exigidos pelo mercado. A redução do tempo de análise não apenas aumentou a eficiência da produção, mas também melhorou a satisfação do cliente, que passou a receber produtos de alta qualidade em prazos mais curtos.

Figura 8 – Imagens microscópica 200X no novo processo



Fonte: Autor (2025)

A Figura 8 demonstra o refinamento obtido com o novo processo de acabamento, evidenciando a diferença crucial em relação ao método anterior. No sistema atual, a camada cimentada apresenta valores de dureza controlados: enquanto amostras com espessura de 0,50 mm alcançam ≈ 750 HV (escala Vickers), peças mais finas (0,20 mm) registram ≈ 570 HV, conforme a relação inversa entre espessura e dureza. As imagens metalográficas, ampliadas 200x, revelam a homogeneidade da microestrutura após o polimento automatizado, eliminando imperfeições superficiais que antes demandavam horas de preparação manual. Este avanço permitiu a análise imediata de características críticas, como porosidade e distribuição de fases, contrastando com o método tradicional – lento e propenso a deformações térmicas ("queima") – que comprometia a integridade das amostras. A padronização do processo assegura agora resultados reproduzíveis em tempo reduzido, otimizando a qualidade do controle metrológico.

Os resultados obtidos demonstram que a otimização das etapas do processo de cementação, aliada à implementação de práticas de melhoria contínua, é

essencial para aumentar a competitividade da empresa no mercado. A pesquisa também sugere que as soluções encontradas podem ser replicadas em outras empresas do setor, promovendo uma evolução na qualidade e eficiência dos processos produtivos.

Em suma, a análise dos dados e as discussões realizadas confirmam que a modernização dos processos e a adoção de metodologias de melhoria contínua são fundamentais para garantir a eficiência e a qualidade nos processos de usinagem e cementação. As conclusões ressaltam a necessidade de um planejamento adequado e da implementação de práticas que assegurem a confiabilidade e a durabilidade dos componentes utilizados em sistemas mecânicos.

Os impactos da implementação do novo processo na empresa são apresentados na tabela 4, conforme exposto a melhoria impacta no meio ambiente, na qualidade interna, no custo interno, na qualidade interna, na produtividade interna e no custo externo.

Tabela 4–Impactos nos setores da organização

IMPACTOS	DESCRIÇÃO
Segurança	Redução de falhas prematuras e acidentes operacionais devido à maior resistência ao desgaste e fadiga dos componentes.
Entrega	Cumprimento de prazos garantido pela menor necessidade de paradas não programadas para manutenção ou substituição de peças.
Produtividade	Aumento da eficiência operacional (ex: +200% na produção diária) com componentes que exigem menos intervenções.
Qualidade	Elevação da conformidade dimensional (99,8%) e microestrutural (HV controlado), assegurando padrões internacionais.
Custos	Redução de 74,8% nos custos operacionais/peça (R\$25,00 → R\$6,30) e diminuição de desperdícios (até 70% em abrasivos).

Fonte: Autor (2025)

A implementação do novo processo trouxe avanços estratégicos em múltiplas dimensões operacionais, conforme detalhado na Tabela 5. Na segurança, a maior confiabilidade dos componentes reduziu riscos de falhas críticas, minimizando acidentes e garantindo conformidade com normas técnicas. Isso está diretamente ligado à produtividade, que registrou um salto de 200% na produção diária, viabilizado pela redução de paradas não programadas. A qualidade, por sua vez, atingiu padrões excepcionais (99,8% de conformidade dimensional e controle microestrutural), assegurando que as engrenagens atendam a exigências de aplicações dinâmicas. Já a redução de custos (74,8% por peça) reflete a eficiência do novo processo, com menor consumo de insumos e energia, enquanto a entrega confiável fortaleceu a reputação da empresa no mercado.

Além dos ganhos operacionais, os impactos ambientais e externos destacam um modelo produtivo sustentável. A redução de 12% no desperdício de matérias-primas e 35% no consumo de óleo hidráulico demonstram alinhamento com práticas ecoeficientes, reduzindo a pegada ambiental. Simultaneamente, a combinação entre custos competitivos (R\$6,30/peça) e qualidade certificada (ISO 9001) ampliou a vantagem estratégica da empresa, permitindo ofertar produtos premium a preços acessíveis. Essa sinergia entre confiabilidade técnica, eficiência econômica e responsabilidade ambiental consolida um ciclo virtuoso, onde ganhos internos se traduzem em reconhecimento externo e liderança de mercado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo a otimização da preparação metalográfica de controle de qualidade em um processo de cementação, visando a redução do tempo de preparo. A cementação é um tratamento termoquímico essencial na indústria metalúrgica, utilizado para aumentar a resistência ao desgaste de componentes críticos, como eixos e engrenagens.

A implementação do sistema automatizado de acabamento superficial trouxe transformações significativas para o processo industrial, destacando-se em múltiplas dimensões. Em termos de eficiência operacional, a redução de 70% no tempo de produção por peça – de 15 para 4,5 minutos em média – permitiu otimizar a capacidade produtiva, eliminando gargalos associados às etapas manuais sequenciais. Essa agilidade é complementada pela unificação das operações em um único ciclo controlado por CNC, que elimina a necessidade de intervenções constantes e reduz riscos de erro humano. A dimensão ambiental e econômica também foi reforçada, com redução de 45% a 70% no consumo de abrasivos, graças à adoção de discos diamantados de maior durabilidade. Essa economia, aliada à minimização de resíduos, alinha o processo a princípios de economia circular, reduzindo custos operacionais e impacto ecológico.

Embora o investimento inicial em tecnologia CNC e automação seja elevado, o retorno justifica-se pela eliminação de retrabalhos, redução de falhas (como sobrepressão localizada) e ganhos em competitividade de mercado. Olhando para o futuro, a integração de controles pneumáticos adaptativos e sistemas de IA preditiva poderá elevar ainda mais a precisão, ajustando parâmetros em tempo real conforme variações na dureza do material (570-750 HV).

A modernização não apenas superou limitações históricas do método manual, mas posicionou a operação na vanguarda da Indústria 4.0, assegurando precisão, repetibilidade e resiliência frente às exigências globais por qualidade, sustentabilidade e eficiência produtiva.

Os resultados obtidos demonstraram que a automação dos equipamentos e a modernização dos processos não apenas aumentaram a eficiência, mas também garantiram a qualidade dos produtos finais. A análise metalográfica, que

anteriormente era um gargalo na produção, agora é realizada de forma mais ágil e precisa, permitindo que a empresa atenda às demandas do mercado com maior rapidez e qualidade. As hipóteses levantadas no início do trabalho foram confirmadas, evidenciando que a otimização do processo de cementação é viável e traz benefícios tangíveis para a produção, como a redução de custos e o aumento da competitividade.

Além disso, a pesquisa destacou a importância de um controle rigoroso durante a preparação das amostras, assegurando que as peças tratadas atendam aos padrões exigidos pelo mercado. A análise qualitativa e quantitativa dos dados coletados permitiu uma compreensão mais profunda das etapas do processo de cementação, possibilitando a identificação de pontos críticos que poderiam ser otimizados. Essa abordagem não apenas melhorou a eficiência, mas também garantiu que a qualidade dos produtos finais fosse mantida, refletindo a importância de um processo de controle de qualidade robusto e eficaz na indústria metalúrgica.

Em suma, este trabalho não apenas contribui para a área de usinagem, mas também estabelece um modelo que pode ser replicado em outras empresas do setor, promovendo a melhoria contínua e a competitividade no mercado. A adoção de práticas de otimização e a implementação de metodologias de melhoria contínua são fundamentais para garantir a eficiência e a qualidade nos processos de usinagem e cementação, assegurando a sustentabilidade e o sucesso a longo prazo das operações industriais.

Para futuras pesquisas, recomenda-se a exploração de novas tecnologias e metodologias que possam ser aplicadas ao processo de cementação, como o uso de atmosferas controladas e novos agentes de cementação que minimizem o impacto ambiental. Além disso, a investigação de outros processos de usinagem e a aplicação de práticas de melhoria contínua em diferentes contextos industriais podem contribuir para a evolução da qualidade e eficiência dos processos produtivos.

Outra sugestão é a realização de estudos comparativos entre diferentes métodos de análise metalográfica, visando identificar quais técnicas oferecem os melhores resultados em termos de precisão e tempo de análise. A pesquisa também pode ser ampliada para incluir a análise de custos associados à implementação das melhorias propostas, permitindo uma avaliação mais abrangente dos benefícios econômicos e operacionais.

REFERÊNCIAS

ALCIATORE, D. G.; HISTAND, M. B. **Introdução à Mecatrônica e aos Sistemas de Medições**. AMGH Editora, 2014.

ALMEIDA, P. S. ; ROCCA, J. E. Processos de usinagem: utilização e aplicações das principais máquinas operatrizes.–. **Editora Érica**, 2015.

BASSI, E. et al. Fatores de sustentação dos resultados do kaizen na produtividade: estudo de caso múltiplo. **Revista Produção Online**, v. 20, n. 1, p. 275-295, 2020.

BIKEDEKHO. **As 5 melhores motocicletas com baixo consumo de combustível no segmento de 200-250 cc** (2018). Disponível em:
http://timesofindia.indiatimes.com/articleshow/64731707.cms?utm_source=contentofinterest&utm_medium=text&utm_campaign=cppst. Acesso em 10 de fevereiro de 2025

DOS SANTOS, I. R.; DE SOUZA OLIVEIRA, L.; VENANZI, D. Kaizen no processo da empresa ABC: estudo de caso. **REFAS: Revista FATEC Zona Sul**, v. 7, n. 3, p. 5, 2021.

CÂMARA, Júlio César Chaves. **Monitoramento eletrônico da mistura ar/combustível em motores de combustão interna ciclo Otto**. Dissertação (mestrado) ± Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, 2006.

CECÍLIO, B. A. B. **proposta de planejamento dos processos de usinagem de eixos de esteiras transportadoras**. TCC-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2021.

DELLA, L. P. **Aplicação da metodologia Kaizen para reduzir o refugo inerente ao processo no corte de barras em uma seção de usinagem**. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialista em Engenharia da Produção) Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, 2020.

DE ALMEIDA, P. S. **Gestão da Manutenção Aplicado às Áreas Industrial, Predial e Elétrica**. Editora Saraiva, 2018.

EBERSBACH, F. G. et al. Análise das componentes da força de usinagem no torneamento de compósitos autolubrificantes sinterizados. In: **10th Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**. p. 05-07, 2019.