



## TRATAMENTO TÉRMICO DE AÇOS INDUSTRIAIS: IMPACTOS NA PERFORMANCE DE BROCAS E FRESAS

## HEAT TREATMENT OF INDUSTRIAL STEELS: IMPACTS ON THE PERFORMANCE OF DRILLS AND CUTTERS

## TRATAMIENTO TÉRMICO DE ACEROS INDUSTRIALES: IMPACTOS EN EL RENDIMIENTO DE TALADROS Y CORTADORAS



<https://doi.org/10.56238/levv15n43-141>

Data de submissão: 27/11/2024

Data de publicação: 27/12/2024

Jean Carlos Norato

### RESUMO

O presente artigo analisa os impactos do tratamento térmico em aços industriais, com ênfase na performance de brocas e fresas, investigando como variáveis de têmpera, revenimento, criogenia e rotas alternativas de processamento interferem diretamente na microestrutura e, conseqüentemente, nas propriedades mecânicas e tribológicas. A pesquisa estruturou-se em caráter bibliográfico e documental, com base em dissertações, teses e estudos científicos que abordam a aplicação prática desses processos. Os resultados evidenciam que a definição criteriosa de parâmetros térmicos promove maior dureza, estabilidade dimensional e resistência ao desgaste, aspectos que elevam a durabilidade das ferramentas de corte e reduzem custos produtivos. Também se verificou que o emprego de técnicas inovadoras, como tratamentos criogênicos profundos e rotas de metalurgia do pó, amplia as possibilidades de aplicação, assegurando maior sustentabilidade e competitividade à indústria de usinagem. A análise crítica permitiu confirmar que o tratamento térmico, associado ou não a revestimentos superficiais, configura-se como elemento estratégico para o desenvolvimento de ferramentas de alto desempenho, consolidando sua importância científica e tecnológica no cenário industrial.

**Palavras-chave:** Tratamento Térmico. Aços Industriais. Brocas. Fresas. Desempenho.

### ABSTRACT

This article analyzes the impacts of heat treatment on industrial steels, with emphasis on the performance of drills and milling cutters, investigating how variables such as quenching, tempering, cryogenics, and alternative processing routes directly affect the microstructure and, consequently, the mechanical and tribological properties. The research was structured as a bibliographic and documentary study, based on dissertations, theses, and scientific works that address the practical application of these processes. The results show that the careful definition of thermal parameters promotes higher hardness, dimensional stability, and wear resistance, aspects that increase the durability of cutting tools and reduce production costs. It was also found that the use of innovative techniques, such as deep cryogenic treatments and powder metallurgy routes, expands application possibilities, ensuring greater sustainability and competitiveness in the machining industry. The critical analysis confirmed that heat treatment, whether associated or not with surface coatings, is configured as a strategic element for the development of high-performance tools, consolidating its scientific and technological importance in the industrial context.



**Keywords:** Heat Treatment. Industrial Steels. Drills. Milling Cutters. Performance.

## **RESUMEN**

Este artículo analiza los impactos del tratamiento térmico en aceros industriales, con énfasis en el rendimiento de brocas y fresas, investigando cómo el temple, el revenido, la criogenia y los métodos de procesamiento alternativos impactan directamente en la microestructura y, en consecuencia, en las propiedades mecánicas y tribológicas. La investigación se estructuró de forma bibliográfica y documental, con base en disertaciones, tesis y estudios científicos que abordan la aplicación práctica de estos procesos. Los resultados muestran que la definición cuidadosa de los parámetros térmicos promueve una mayor dureza, estabilidad dimensional y resistencia al desgaste, aspectos que aumentan la durabilidad de las herramientas de corte y reducen los costos de producción. También se encontró que el uso de técnicas innovadoras, como los tratamientos criogénicos profundos y los métodos de pulvimetalurgia, amplía las posibilidades de aplicación, garantizando una mayor sostenibilidad y competitividad para la industria del mecanizado. El análisis crítico confirmó que el tratamiento térmico, asociado o no a recubrimientos superficiales, es un elemento estratégico para el desarrollo de herramientas de alto rendimiento, consolidando su importancia científica y tecnológica en el panorama industrial.

**Palabras clave:** Tratamiento Térmico. Aceros Industriales. Brocas. Fresas. Rendimiento.

## 1 INTRODUÇÃO

O tratamento térmico aplicado a aços industriais consolidou-se como um recurso essencial para a engenharia de materiais, pois influencia de maneira direta as propriedades mecânicas, a estabilidade microestrutural e o desempenho final de ferramentas de corte, como brocas e fresas, amplamente utilizadas em processos de usinagem de alta responsabilidade (Souza, 2024).

A alteração controlada da microestrutura por meio de aquecimento e resfriamento programados permite alcançar dureza elevada, resistência ao desgaste e adequada tenacidade, características indispensáveis para que as ferramentas mantenham eficiência mesmo em condições severas de operação, garantindo maior vida útil e confiabilidade (Santos, 1999).

Com a crescente demanda por eficiência produtiva, pesquisas avançam na definição de parâmetros ideais de têmpera, revenimento e criogenia, investigando as melhores combinações para reduzir falhas prematuras, evitar deformações indesejadas e assegurar estabilidade dimensional durante longos ciclos de trabalho (Moura, 2012).

O emprego de revestimentos funcionais em conjunto com os tratamentos térmicos tem mostrado resultados significativos, uma vez que a interação entre superfície e núcleo do material fortalece a resistência ao desgaste abrasivo, permitindo que as ferramentas mantenham a aresta de corte afiada por períodos prolongados de utilização (Pereira, 2017).

A relevância dessa temática decorre do impacto direto na produtividade industrial, já que a durabilidade das ferramentas reduz custos de substituição e melhora a qualidade das peças produzidas, assegurando acabamento superficial adequado e integridade dimensional em diferentes setores produtivos (Silva, 2019).

Além das vantagens econômicas, surgem perspectivas ligadas à sustentabilidade. A reutilização de ligas por meio da metalurgia do pó, associada à moagem de alta energia, possibilita o aproveitamento de resíduos metálicos, ao mesmo tempo em que conserva propriedades de resistência e dureza próximas às obtidas em materiais originais, reforçando alternativas de produção mais responsáveis (Gonçalves, 2021).

O objetivo central deste estudo é analisar os impactos do tratamento térmico em aços industriais, com ênfase na performance de brocas e fresas, reunindo evidências científicas sobre a relação entre microestrutura, dureza, desgaste e vida útil de ferramentas submetidas a diferentes rotas de aquecimento, resfriamento e revenimento.

A justificativa para a investigação está no fato de que ajustes criteriosos dos parâmetros térmicos podem prolongar significativamente a durabilidade das ferramentas, reduzir interrupções no processo produtivo e, consequentemente, elevar a competitividade industrial em mercados de elevada exigência tecnológica.

O aprofundamento nesse campo favorece também o avanço científico, permitindo que novos trabalhos se apoiem em resultados consolidados e possam explorar lacunas ainda existentes, sobretudo na integração entre tratamentos convencionais e processos inovadores como a criogenia profunda e os ciclos múltiplos de revenimento (Sartori, 2021).

Ferramentas fabricadas com aços rápidos, como o ABNT M2, têm sido objeto de estudos comparativos que demonstram ganhos expressivos de dureza e estabilidade após a aplicação de técnicas combinadas, evidenciando a importância de compreender como cada variável térmica se reflete nas propriedades finais do material (Silva, 2019).

Também merece destaque o uso de aços altamente ligados, como os do grupo Vanadis, que ao serem processados por rotas alternativas, apresentam propriedades de elevada resistência mecânica, estabilidade dimensional e vida útil superior, abrindo espaço para soluções mais eficazes em aplicações de alto desempenho (Gonçalves, 2021).

Dessa forma, a introdução estabelece o contexto, os fundamentos científicos, o objetivo e a justificativa da pesquisa, reforçando que o tratamento térmico de aços industriais representa um campo estratégico para a inovação tecnológica, a sustentabilidade dos processos produtivos e o fortalecimento da competitividade na indústria global (Souza, 2024).

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 FUNDAMENTOS DO TRATAMENTO TÉRMICO EM AÇOS INDUSTRIAIS**

Os aços industriais apresentam características microestruturais que podem ser profundamente modificadas por meio do tratamento térmico, processo que envolve o aquecimento a temperaturas específicas seguido de resfriamento controlado, provocando transformações de fase que alteram propriedades como dureza, resistência ao desgaste e tenacidade, fundamentais para ferramentas de corte (Souza, 2024).

O mecanismo mais empregado em aços de alto carbono e aços rápidos é a têmpera, que promove a formação de martensita, estrutura de elevada dureza, porém frágil, a qual necessita de posterior tratamento de revenimento para ajustar a tenacidade e reduzir a possibilidade de fraturas prematuras, mantendo desempenho consistente em brocas e fresas (Santos, 1999).

Além da têmpera e de outras técnicas complementares vêm sendo estudadas, como o tratamento criogênico, que utiliza temperaturas extremamente baixas para transformar a austenita retida em martensita, aumentando a estabilidade dimensional e favorecendo a precipitação de carbonetos finos, fatores que prolongam a vida útil das ferramentas (Silva, 2019).

A eficiência do tratamento térmico depende da composição química do aço, principalmente dos elementos de liga como cromo, molibdênio, tungstênio e vanádio, que contribuem para a formação de

carbonetos, estruturas responsáveis por aumentar a dureza e melhorar a resistência ao desgaste em aplicações industriais severas (Sartori, 2021).

Esses processos de aquecimento e resfriamento controlado possibilitam a personalização das propriedades mecânicas de acordo com a aplicação desejada, tornando viável projetar ferramentas de corte mais duráveis e adaptadas às condições de operação, sejam de corte contínuo, intermitente ou em altas velocidades (Corrêa et al., 2021).

No caso de brocas helicoidais e fresas de topo, a correta aplicação do tratamento térmico garante não apenas a preservação da aresta cortante, mas também a manutenção da geometria da ferramenta durante esforços repetitivos, reduzindo vibrações e assegurando qualidade dimensional das peças usinadas (Moura, 2012).

As microestruturas resultantes, como a martensita revenida, a bainita e os diferentes arranjos de carbonetos, são analisadas por técnicas de microscopia e ensaios de dureza, permitindo compreender como variações sutis na temperatura ou no tempo de aquecimento podem impactar diretamente na performance em corte (Pereira, 2017).

Em investigações realizadas com aços ABNT M2, verificou-se que o emprego de duplo revenimento após a têmpera resultou em propriedades superiores quando comparado ao recozimento parcial simples, indicando que múltiplos ciclos podem ser estratégicos para elevar a vida útil das ferramentas (Silva, 2019).

Outro aspecto relevante é a interação entre microestrutura e tensões residuais, pois a escolha inadequada de parâmetros térmicos pode gerar distorções dimensionais e trincas internas, comprometendo a confiabilidade da ferramenta e levando à necessidade de substituições frequentes, o que aumenta os custos industriais (Souza, 2024).

A literatura destaca ainda que a uniformidade do resfriamento exerce papel determinante, visto que gradientes acentuados de temperatura podem causar heterogeneidade microestrutural, comprometendo a dureza em regiões específicas da ferramenta e criando pontos críticos de falha em brocas e fresas (Santos, 1999).

A compreensão desses mecanismos é fundamental para o avanço tecnológico, pois possibilita não só a escolha de parâmetros otimizados de aquecimento e resfriamento, mas também o desenvolvimento de novas rotas de tratamento adaptadas às ligas modernas, ampliando as fronteiras de aplicação industrial dos aços (Gonçalves, 2021).

Portanto, os fundamentos do tratamento térmico em aços industriais revelam sua importância como base para a compreensão das propriedades finais de ferramentas de corte, permitindo projetar soluções técnicas mais eficientes e alinhadas às exigências de produtividade e qualidade da manufatura moderna (Coêlho, 2019).

## 2.2 DESEMPENHO DE BROCAS E FRESAS SUBMETIDAS AO TRATAMENTO TÉRMICO

As ferramentas de corte, especialmente brocas e fresas, são amplamente utilizadas em processos industriais e sua durabilidade está diretamente associada ao tipo de aço empregado e ao tratamento térmico ao qual foram submetidas, pois a combinação adequada desses fatores garante maior resistência ao desgaste e aumento da vida útil em aplicações contínuas de usinagem (Moura, 2012).

Em estudos comparativos sobre o fresamento de aços para moldes, verificou-se que ferramentas reafiadas, quando submetidas a ciclos térmicos e revestimentos modernos, mantiveram desempenho próximo ao de ferramentas novas, revelando que a qualidade do tratamento térmico influencia mais no resultado do que a condição de uso inicial (Pereira, 2017).

Aços rápidos, como o ABNT M2, são amplamente empregados na fabricação de brocas helicoidais, pois apresentam equilíbrio entre dureza e tenacidade quando submetidos a têmpera, o que garante elevada resistência ao desgaste e eficiência em operações de furação e fresamento prolongadas (Silva, 2019).

Ferramentas fabricadas com ligas de alto teor de elementos de liga, submetidas a tratamentos criogênicos, demonstraram aumento significativo da estabilidade dimensional, com redução da quantidade de austenita retida e maior homogeneidade na distribuição de carbonetos, prolongando a resistência ao desgaste em operações severas (Corrêa et al., 2021).

A literatura descreve que, além do tratamento térmico, a escolha do revestimento superficial da ferramenta influencia o desempenho, mas que a interação entre núcleo tratado e revestimento é o fator determinante para a durabilidade, visto que camadas superficiais de TiAlN ou AlCrN apenas alcançam eficiência máxima quando apoiadas por um substrato adequadamente endurecido (Moura, 2012).

Testes tribológicos realizados em fresas e brocas evidenciaram que a resistência ao desgaste por abrasão está diretamente associada ao tamanho e à distribuição de carbonetos formados após a têmpera, comprovando que microestruturas mais homogêneas resultam em maior confiabilidade em corte (Souza, 2024).

Nas análises experimentais, observou-se que brocas submetidas a múltiplos tratamentos de revenimentos apresentaram melhor desempenho em relação àquelas tratadas em ciclo único, revelando que a repetição do processo pode refinar a microestrutura e aumentar a resistência, favorecendo a integridade da ferramenta em longos períodos de operação (Sartori, 2021).

O uso de fresas fabricadas com aços de alto carbono e revenidas em temperaturas adequadas mostrou resultados superiores em ensaios de microdureza, indicando que pequenas variações na temperatura são capazes de alterar de forma expressiva a resposta da ferramenta em contato com materiais de elevada resistência (Coêlho, 2019).

O emprego de técnicas modernas de análise metalográfica permitiu identificar que brocas tratadas termicamente apresentam menores níveis de desgaste adesivo, com maior preservação da geometria da aresta de corte, garantindo precisão dimensional na peça final e reduzindo a ocorrência de falhas prematuras (Pereira, 2017).

A avaliação da rugosidade superficial após operações de furação com ferramentas tratadas termicamente evidenciou que, além da durabilidade, há também benefícios na qualidade do acabamento, aspecto que reforça a importância do controle microestrutural para assegurar padrões elevados de manufatura (Silva, 2019).

Ensaio de vida útil demonstraram que fresas fabricadas com aços rápidos submetidos a ciclos combinados de têmpera, contudo, a criogenia apresentou desempenho superior em comparação a ferramentas convencionais, confirmando que o aperfeiçoamento do tratamento térmico é decisivo para ampliar a resistência em corte (Gonçalves, 2021).

Assim, o estudo do desempenho de brocas e fresas submetidas ao tratamento térmico confirma que os avanços nesse campo possibilitam maior confiabilidade, redução de custos e eficiência produtiva, consolidando o tratamento térmico como fator estratégico para a evolução da indústria de usinagem (Santos, 1999).

## 2.3 AVANÇOS TECNOLÓGICOS E PERSPECTIVAS DO TRATAMENTO TÉRMICO EM FERRAMENTAS DE CORTE

A evolução tecnológica aplicada ao tratamento térmico de aços industriais trouxe novas possibilidades para o aumento da durabilidade de ferramentas, resultado da integração entre técnicas convencionais e processos inovadores que ampliam a eficiência em aplicações críticas de corte, como o fresamento de aços para moldes e a furação de ligas de elevada resistência (Souza, 2024).

Entre os avanços mais significativos destacam-se os tratamentos criogênicos, que atuam em temperaturas inferiores a  $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , promovendo a transformação quase completa da austenita retida em martensita e favorecendo a precipitação de carbonetos mais finos, o que resulta em maior resistência ao desgaste e estabilidade dimensional em operações prolongadas (Silva, 2019).

A incorporação da metalurgia do pó associada à moagem de alta energia representa outro marco, permitindo a produção de aços ferramenta de alta liga com microestruturas homogêneas e melhor controle da distribuição de carbonetos, ao mesmo tempo em que possibilita a reutilização de resíduos metálicos, contribuindo para práticas sustentáveis no setor industrial (Gonçalves, 2021).

A pesquisa aplicada em aços da classe Vanadis revelou que a sinterização de pós metálicos combinada a tratamentos de têmpera e revenimento gera materiais com desempenho equivalente ou superior ao de aços convencionais, oferecendo alternativas mais econômicas e ambientalmente responsáveis para a fabricação de brocas e fresas (Corrêa et al., 2021).



O desenvolvimento de revestimentos multicamadas associados a substratos tratados termicamente também merece destaque, visto que a combinação de camadas de TiAlN, AlCrN e SiO<sub>2</sub> com microestruturas endurecidas proporcionou redução significativa no desgaste abrasivo, prolongando a vida útil de ferramentas de usinagem (Pereira, 2017).

As perspectivas apontam para uma integração cada vez maior entre o tratamento térmico e a engenharia de superfície, pois a interação entre núcleo e revestimento torna-se fundamental para alcançar desempenho otimizado, permitindo que as ferramentas operem em condições extremas de velocidade e pressão sem perda de eficiência (Moura, 2012).

Pesquisas envolvendo aços rápidos ABNT M2 indicam que a aplicação de revestimentos múltiplos combinados a criogenia profunda garante desempenho superior, uma vez que promove estabilidade térmica, aumento da dureza secundária e maior resistência ao desgaste, consolidando essa rota como promissora para ferramentas de corte de alto desempenho (Silva, 2019).

Novos modelos computacionais têm auxiliado no estudo das transformações microestruturais durante o tratamento térmico, permitindo prever a distribuição de fases e otimizar os parâmetros de processo, recurso que reduz custos experimentais e acelera o desenvolvimento de ligas e tratamentos personalizados (Sartori, 2021).

Os avanços tecnológicos também se estendem à automação dos fornos e sistemas de resfriamento, capazes de controlar com precisão variáveis críticas como taxa de aquecimento, velocidade de resfriamento e atmosfera protetora, fatores que determinam a qualidade final do aço e sua adequação ao uso em ferramentas de corte (Souza, 2024).

A tendência atual é a integração entre ciência dos materiais e manufatura avançada, em que tratamentos térmicos customizados são aplicados de acordo com a função e o ambiente operacional da ferramenta, buscando máxima performance com mínima necessidade de substituição e manutenção (Coelho, 2019).

Estudos recentes mostram que a combinação de tratamentos térmicos convencionais com técnicas modernas de caracterização, como difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura, possibilita compreender de forma mais detalhada a evolução microestrutural dos aços, contribuindo para o aprimoramento contínuo das rotas de processamento (Santos, 1999).

Nesse cenário, as perspectivas futuras apontam para o desenvolvimento de ferramentas mais duráveis, eficientes e sustentáveis, baseadas em aços de alta liga tratados termicamente em condições controladas, capazes de atender às exigências de indústrias de ponta como a automotiva, aeroespacial e de moldes, assegurando competitividade global para empresas que investem em inovação (Gonçalves, 2021).



### 3 METODOLOGIA

A metodologia constitui a base estruturante de qualquer pesquisa científica, pois estabelece o caminho a ser percorrido para alcançar os objetivos propostos. A escolha adequada do método confere validade e confiabilidade aos resultados, garantindo que as conclusões apresentem consistência teórica e aplicabilidade prática, aspectos defendidos por Gil ao destacar que o método é um instrumento de ordenação do pensamento e da investigação (Gil, 2008).

Segundo Lakatos, a construção metodológica deve alinhar-se ao problema estudado, considerando a natureza do objeto de pesquisa, o tipo de abordagem e os recursos disponíveis, o que assegura maior coerência entre o referencial teórico e os procedimentos empíricos adotados (Lakatos, 2003).

O presente estudo caracteriza-se como pesquisa aplicada, de caráter exploratório e descritivo, pois busca analisar o impacto do tratamento térmico na performance de brocas e fresas, partindo da sistematização de conhecimentos existentes para propor interpretações capazes de sustentar avanços tecnológicos e industriais no setor (Gil, 2008).

Do ponto de vista da abordagem, a pesquisa assume caráter qualitativo, pois concentra-se na interpretação de resultados experimentais já publicados, bem como na análise de fundamentos teóricos que explicam a relação entre microestrutura, dureza e resistência ao desgaste em ferramentas de corte, permitindo identificar padrões e tendências de desempenho (Lakatos, 2003).

Os procedimentos técnicos empregados correspondem à pesquisa bibliográfica e documental, realizada com base em dissertações, teses, artigos científicos e materiais técnicos de instituições reconhecidas, consolidando um corpus de análise que possibilita compreender a aplicação prática dos tratamentos térmicos em diferentes contextos industriais (Gil, 2008).

A pesquisa bibliográfica possibilita reunir informações dispersas em múltiplas fontes, permitindo o confronto de ideias e a construção de um panorama abrangente, enquanto a pesquisa documental agrega dados originais e registros técnicos, complementando as análises e garantindo maior profundidade interpretativa (Lakatos, 2003).

Os materiais consultados foram selecionados a partir de critérios de relevância científica, atualidade e pertinência ao tema, assegurando que apenas estudos diretamente relacionados ao tratamento térmico de aços industriais e à performance de ferramentas de corte fossem considerados, de modo a manter o foco e a coerência da investigação (Gil, 2008).

A análise seguiu o método dedutivo, partindo de conceitos gerais relacionados ao tratamento térmico e suas aplicações, avançando para interpretações específicas sobre a influência desses processos no desempenho de brocas e fresas, estratégia que permite articular teoria e prática de forma integrada e consistente (Lakatos, 2003).

O tratamento das informações obtidas deu-se por meio de leitura crítica, síntese interpretativa e organização temática, possibilitando identificar convergências e divergências entre os autores e destacando os pontos de maior relevância científica e tecnológica para o campo da engenharia de materiais (Gil, 2008).

Dessa forma, a metodologia aqui adotada garante rigor acadêmico e clareza científica, permitindo que os resultados discutidos estejam fundamentados em bases sólidas, com respaldo teórico-metodológico e com a credibilidade exigida em pesquisas da área de engenharia e ciências aplicadas.

#### **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A análise dos resultados obtidos em estudos envolvendo o tratamento térmico de aços industriais evidencia que as variações de temperatura, tempo de permanência e taxa de resfriamento exercem papel determinante na microestrutura final, impactando diretamente o desempenho de brocas e fresas em condições de corte severas (Souza, 2024).

Nos experimentos realizados com o aço rápido ABNT M2, observou-se que a aplicação de revenimentos múltiplos, após a têmpera, promoveu melhor distribuição dos carbonetos e maior estabilidade dimensional, resultando em aumento da dureza secundária e maior resistência ao desgaste, fatores que repercutem diretamente na durabilidade da ferramenta (Silva, 2019).

Os ensaios de microdureza em aços ferramenta mostraram que pequenas variações na temperatura de revenimento influenciam de forma expressiva o desempenho final, pois valores próximos a 500 °C favoreceram a precipitação de carbeto finos, elevando a dureza e proporcionando equilíbrio entre resistência e tenacidade, condição ideal para fresas de topo utilizadas em altas velocidades de corte (Coelho, 2019).

Estudos comparativos sobre brocas revestidas revelaram que a aplicação de revestimentos multicamadas só alcança eficiência máxima quando associada a substratos adequadamente tratados termicamente, pois a interação entre núcleo endurecido e superfície protegida garante maior resistência à abrasão e preservação da aresta cortante durante operações prolongadas (Pereira, 2017).

Na análise de fresas reafiadas e novamente submetidas a tratamento térmico, os resultados mostraram desempenho semelhante ao de ferramentas novas, confirmando que o processo de condicionamento aliado a ciclos de têmpera e revenimento bem definidos constitui alternativa economicamente viável e tecnicamente eficaz para a indústria (Moura, 2012).

A utilização de tratamentos criogênicos profundos em aços rápidos revelou benefícios significativos, com a transformação quase completa da austenita retida em martensita e a precipitação de carbonetos mais homogêneos, aumentando a resistência ao desgaste e ampliando o tempo de uso de brocas e fresas em condições críticas (Silva, 2019).

As pesquisas com aços Vanadis processados por metalurgia do pó e sinterização mostraram que é possível obter propriedades mecânicas e tribológicas superiores às de aços convencionais, o que abre caminho para a aplicação de rotas sustentáveis de fabricação de ferramentas, aliando desempenho técnico à responsabilidade ambiental (Gonçalves, 2021).

Resultados experimentais confirmaram que ferramentas tratadas termicamente apresentaram menor nível de desgaste adesivo, mantendo a geometria da aresta e reduzindo falhas prematuras, aspecto de grande importância para operações de usinagem em que a precisão dimensional do produto é determinante (Sartori, 2021).

A análise da rugosidade superficial após furações realizadas com brocas submetidas a ciclos de revenimento indicou melhoria significativa na qualidade do acabamento, fator que reforça a necessidade de ajustes criteriosos nos parâmetros de tratamento térmico, pois além da durabilidade da ferramenta, assegura também maior valor agregado às peças produzidas (Corrêa et al., 2021).

Em estudos laboratoriais, observou-se que a aplicação de tratamentos combinados, envolvendo têmpera, criogenia e revenimentos múltiplos, possibilitou a redução de tensões residuais internas, condição essencial para a preservação da integridade estrutural da ferramenta e para o aumento da confiabilidade em ambientes produtivos de alta exigência (Silva, 2019).

A integração entre avanços tecnológicos em revestimentos e o aperfeiçoamento dos tratamentos térmicos ampliou a competitividade industrial, uma vez que ferramentas com desempenho superior contribuem para reduzir o tempo de parada das máquinas, aumentar a produtividade e minimizar custos relacionados à substituição de brocas e fresas (Pereira, 2017).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise desenvolvida ao longo deste estudo permitiu compreender a relevância do tratamento térmico aplicado a aços industriais como fator decisivo para a performance de ferramentas de corte, demonstrando que a modificação controlada da microestrutura eleva a durabilidade, otimiza a resistência ao desgaste e assegura estabilidade dimensional em operações críticas de usinagem.

O levantamento de pesquisas evidenciou que parâmetros como temperatura de austenitização, tempo de permanência, taxa de resfriamento e número de revenimentos são variáveis que influenciam diretamente na resposta final do material, sendo capazes de transformar a eficiência de brocas e fresas em ambientes produtivos de alta complexidade.

Observou-se que a aplicação de rotas inovadoras, como o tratamento criogênico e a metalurgia do pó, amplia as possibilidades de aproveitamento de ligas, tornando os processos mais sustentáveis e alinhados às demandas atuais da indústria, sem comprometer a qualidade ou a resistência das ferramentas utilizadas.

Outro aspecto relevante identificado foi a integração entre tratamento térmico e revestimentos funcionais, combinação que potencializa a proteção contra desgaste abrasivo e adesivo, permitindo que as ferramentas mantenham a aresta cortante preservada por maior período, além de reduzir o custo com substituições frequentes.

O estudo demonstrou que a evolução tecnológica no campo dos tratamentos térmicos está diretamente relacionada à capacidade da indústria em atender padrões mais elevados de precisão, produtividade e sustentabilidade, mostrando que investimentos nesse setor representam ganhos concretos para a competitividade global.

Ficou claro que a adoção de metodologias de análise crítica e experimental, associada ao avanço das técnicas de caracterização microestrutural, possibilita maior previsibilidade de resultados, assegurando que os processos aplicados em escala industrial possam ser continuamente aperfeiçoados com base em evidências sólidas.

A partir dos resultados discutidos, conclui-se que o tratamento térmico deve ser entendido não apenas como uma etapa complementar de fabricação, mas como parte integrante do projeto da ferramenta, capaz de definir seu desempenho e sua vida útil em aplicações de elevada exigência tecnológica.

Dessa forma, esse artigo contribui para fortalecer a compreensão de que o desenvolvimento de ferramentas de corte mais resistentes e eficientes depende diretamente da aplicação criteriosa de tratamentos térmicos, os quais se configuram como um dos principais pilares para a inovação, a sustentabilidade e a excelência da manufatura moderna.



## REFERÊNCIAS

COÊLHO, Emilly Silva da Rocha. Análise comparativa da microdureza de um aço rápido temperado e revenido em temperaturas variadas. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2019.

CORRÊA, Edmilson Otoni; SILVA, Gilbert; SILVA, Antonio Augusto Araújo Pinto da; CARDOSO, Kátia Regina. Estudo da reutilização do aço Uddeholm Vanadis® 8 Superclean pela rota da metalurgia do pó a partir da técnica de moagem de alta energia (Mechanical Milling). Dissertação (Mestrado em Materiais para Engenharia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2021.

GONÇALVES, Pedro Henrique. Estudo da reutilização do aço Uddeholm Vanadis® 8 Superclean pela rota da metalurgia do pó a partir da técnica de moagem de alta energia (Mechanical Milling). Dissertação (Mestrado em Materiais para Engenharia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2021.

MOURA, Ricardo Ribeiro. Fresamento de aço para matrizes VP20ISOF com ferramentas reafiadas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

PEREIRA, Natália Fernanda Santos. Análise comparativa do desempenho de brocas de aço rápido AISI M2 revestidas com SiO<sub>2</sub> pelo processo sol-gel na furação do ferro fundido nodular. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

SANTOS, Romário Silva. Estudo de tratamentos térmicos em aços de alto teor de carbono. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1999.

SARTORI, Carlos Humberto. Tratamentos térmicos de aços ferramenta. Itaraí Metalurgia Ltda., São Paulo, 2021.

SILVA, Enrique Leal da. Estudo das propriedades mecânicas e tribológicas do aço ABNT M2 submetido aos tratamentos térmicos e criogênico. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2019.

SOUZA, Oséias Luiz de Oliveira. Efeito dos parâmetros de tratamento térmico na microestrutura e na dureza de aços de alto teor de carbono. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2024.