REVISÃO DE LITERATURA: FERRAMENTAS DIAMANTADAS COM MATRIZES FERROSAS

Diana dos Santos Machado, Sayd Farage David.

Instituto Federal do Espírito Santo, Rodovia - 482 Fazenda Morro Grande - 29311-970 – Cachoeiro de Itapemirim-ES, Brasil, disantmachado@gmail.com, saydfd@gmail.com.

Resumo

Este artigo revisa os avanços recentes em ferramentas diamantadas com matrizes ferrosas, destacando a importância do diamante em operações de corte e perfuração de materiais duros, bem como a relevância das matrizes metálicas na eficácia dessas ferramentas. O estudo analisou a evolução histórica, os métodos de fabricação e as propriedades das matrizes ferrosas, com foco na sinterização sob alta pressão e temperatura. Foram abordados desafios atuais, como a melhoria da aderência entre o diamante e a matriz e a resistência ao desgaste em condições extremas. Os resultados mostraram que, embora as matrizes ferrosas ofereçam vantagens significativas, como melhor desempenho e durabilidade, ainda há desafios a serem superados. A conclusão enfatiza que, apesar dos avanços, a inovação tecnológica e a pesquisa contínua são essenciais para o desenvolvimento futuro dessas ferramentas.

Palavras-chave: Ferramentas diamantadas. Matrizes ferrosas. Metalurgia do pó. Diamantes.

Área do Conhecimento: Engenharias – Engenharia de Materiais e Metalúrgica.

Introdução

As ferramentas diamantadas vêm desempenhando um papel fundamental em diversos setores da indústria, sendo amplamente utilizadas em operações que envolvem corte, perfuração e polimento de materiais. Devido à sua extrema dureza, o diamante é amplamente utilizado como elemento abrasivo, bem como em ferramentas de retificação e corte, como ferramentas circulares ou serras, para o processamento de materiais duros como concreto, carbonetos cimentados ou rochas (Artini *et al*., 2011). No entanto, a eficiência dessas ferramentas depende não só do diamante utilizado, mas também da composição da matriz que o mantém unido e estabilizado.

Durante muito tempo, as matrizes metálicas de ligas de cobalto, bronze e outras ligas não ferrosas têm sido predominantes na produção de ferramentas diamantadas. No entanto, com o avanço tecnológico e a busca por alternativas mais econômicas e sustentáveis, as matrizes ferrosas surgiram como uma opção favorável. Essas matrizes oferecem uma combinação única de propriedades mecânicas e térmicas que podem melhorar o desempenho e a durabilidade das ferramentas diamantadas. De acordo com Artini *et al.* (2011), tais matrizes devem cumprir vários requisitos básicos, principalmente boa compatibilidade química com o diamante, alta densidade e uma taxa de erosão proporcional ao desgaste do diamante.

A sinterização sob alta pressão e temperatura é fundamental para a produção de ferramentas diamantadas com matrizes ferrosas, pois assegura uma ligação robusta e durável entre os grãos de diamante e a matriz metálica. Contudo, apesar dos avanços tecnológicos, ainda persistem desafios significativos, como a melhoria da aderência do diamante ao metal e o aumento da resistência ao desgaste em condições extremas de operação (Konstanty, 2005).

Diante desse cenário, o presente artigo busca, por meio de uma revisão de literatura, investigar os avanços recentes no desenvolvimento de ferramentas diamantadas com matrizes ferrosas, abordando os diferentes métodos de fabricação, a composição das matrizes e suas aplicações práticas. Também discutiremos os principais desafios enfrentados na indústria, bem como as perspectivas futuras para o aprimoramento dessas tecnologias.

Metodologia

Para a elaboração deste artigo de revisão bibliográfica sobre ferramentas diamantadas com matrizes ferrosas, foi adotada uma abordagem metódica e estruturada. A primeira etapa envolveu a definição clara do escopo da revisão, concentrando-se especificamente nas ferramentas diamantadas que utilizam matrizes ferrosas. Foram selecionados artigos científicos coletados em bases de dados como a Web of Science, ScienceDirect e Scopus, além de livros sobre o assunto. Os critérios utilizados para inclusão focaram em estudos que abordassem de forma direta ferramentas diamantadas com matrizes ferrosas, incluindo o processo de metalurgia do pó, as propriedades das matrizes ferrosas e a interação entre a matriz e o diamante.

Após a coleta, procedemos com uma análise crítica dos artigos e livros selecionados, focando na extração das informações mais pertinentes sobre evolução histórica, métodos de fabricação e desempenho das matrizes ferrosas. As informações obtidas foram organizadas de forma a facilitar a compreensão dos principais tópicos abordados.

Com isso, a síntese das informações nos permitiu uma visão mais ampla sobre o atual cenário das ferramentas diamantadas com matrizes ferrosas, possibilitando a identificação de padrões, divergências e oportunidades para pesquisas futuras.

Resultados

A aplicação moderna das ferramentas diamantadas tem cerca de um século, embora o uso inicial do diamante como ferramenta de gravação remonte a 350 a.C. Na Antiguidade, lascas de diamantes quebrados foram aplicadas pela primeira vez como um conjunto em cabos de ferro, ou seja, ferramentas diamantadas ligadas a metal (Tillmann, 2000; Konstanty, 1991).

A ideia de unir o diamante por meio de pós metálicos remonta a 1883, quando Gay descreveu a fabricação de materiais abrasivos incorporando abrasivos tradicionais, como o quartzo ou o corindo (óxido de alumínio) e minerais do grupo das espinelas, como a magnetita ou a hercinite, em uma matriz metálica (Chalus e Konstanty, 1996). Ele mencionou o uso de pós de latão, ferro fundido ou aço e propôs fazer bom uso de técnicas de metalurgia do pó, como prensagem a quente ou infiltração, para formar a matriz (Chalus e Konstanty, 1996).

O termo "ferramentas diamantadas" tem um significado muito amplo. As classificações existentes de ferramentas diamantadas são baseadas em vários critérios, como a quantidade de diamantes envolvidos, sua aparência externa, estrutura interna da ferramenta, sua aplicação, etc.

O diamante, como material, exibe muitas propriedades superiores, entre as quais alta dureza, expansão térmica muito baixa e arestas de corte que lhe permitem atuar como um bom constituinte em ferramentas de corte. Sendo assim, devido à sua extrema dureza, o diamante é amplamente utilizado como elemento abrasivo em suspensões de polimento, bem como em ferramentas de retificação e corte, como ferramentas circulares ou serras, para o processamento de materiais duros como concreto, carbonetos cimentados ou rochas (Artini *et al*., 2011).

O processo de fabricação típico de ferramentas diamantadas envolve duas etapas principais: a produção dos componentes impregnados com diamante e a fixação desses componentes ao suporte da ferramenta. Em alguns casos específicos, como na fabricação de lâminas de serra contínuas ou brocas infiltradas, essas duas etapas são combinadas em um único processo. A consolidação da camada impregnada com diamante ocorre simultaneamente à sua fixação ao corpo da ferramenta (Tonshoff *et al.*, 2002).

A preparação do pó metálico consiste na mistura dos pós selecionados para obter a composição química desejada, bem como a distribuição de forma e tamanho das partículas, considerando a aplicação final do produto. Durante essa preparação, agentes de ligação e lubrificantes são frequentemente adicionados para reduzir a poeira e prevenir a segregação, além de minimizar o desgaste dos moldes de aço e reduzir oxidações durante as operações subsequentes de prensagem a frio e a quente (Konstanty, 2005).

O processo de granulação é necessário quando o pó deve ser compactado a frio. Esse tratamento melhora as características de fluxo e embalagem do pó. A granulação pode ser realizada de várias formas, com técnicas mais antigas baseadas em mistura de alta velocidade e técnicas mais recentes envolvendo um processo de rotação mecânica que integra partículas de diamante em um único passo (Moriya, 1987). Os ligantes orgânicos são usados para unir as partículas de pó e conferir a resistência

mecânica desejada aos grãos. No entanto, é crucial que o ligante possua propriedades térmicas adequadas para sua remoção completa durante a etapa de consolidação a quente (Konstanty, 2005).

A mistura do pó matriz com diamantes pode ser feita com diamantes em condição bruta ou revestidos com um material adequado antes de misturá-los com o pó matriz (Baert, 1995; Kimura, 1988). Uma mistura uniforme é vital para a qualidade do produto final, pois a distribuição não uniforme pode levar ao desgaste prematuro do segmento. O revestimento em pó dos diamantes também contribui para a longevidade dos moldes de prensagem e melhora as características de corte da ferramenta.

A prensagem a frio é utilizada como uma operação de pré-sinterização antes da prensagem a quente na fabricação de segmentos de serra. Em alguns casos, a prensagem a frio pode ser empregada na fabricação de componentes uniformes para o processo de prensagem a quente. Os métodos de prensagem incluem prensas convencionais e prensas volumétricas, sendo as últimas mais produtivas e com menor custo para a produção em massa de pequenos segmentos (Konstanty, 2005).

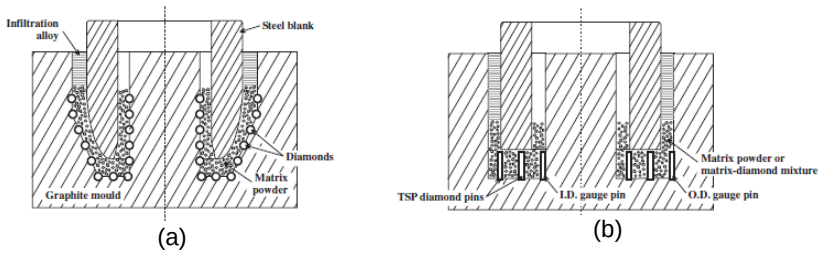
A prensagem a quente, por sua vez, envolve a aplicação simultânea de calor e pressão para obter um produto com pouca porosidade interna. Embora o processo de prensagem a quente seja mais eficiente e menos demorado, ele pode ser limitado pelo tamanho e geometria dos componentes. Equipamentos modernos, como prensas de forno, que aquecem moldes por radiação e convecção, são preferidos para a produção de ferramentas maiores (Konstanty, 2005).

O processo de sinterização, essencial na fabricação de muitos componentes estruturais e ferramentas, tem aplicações limitadas na produção de ferramentas diamantadas devido às restrições na composição e precisão dimensional do produto final. No entanto, técnicas como a sinterização em forno têm sido adaptadas para a produção de certos tipos de lâminas e segmentos (Konstanty, 2005).

A prensagem isostática a quente utiliza pressão isostática aplicada por um gás inerte para obter um material completamente denso. Essa técnica permite a redução da temperatura de consolidação e tem se mostrado útil na fabricação de ferramentas diamantadas, especialmente para a produção em massa de segmentos de serra (Bonneau *et al*., 2002).

O processo de infiltração é ideal para a fabricação de brocas rotativas e bits híbridos, preenchendo os poros interconectados com uma liga líquida de baixo ponto de fusão. Após a colocação dos diamantes e do pó matriz no molde, a liga é derretida e puxada por capilaridade, ligando-se ao suporte de aço. Esse processo é realizado em um forno, com temperaturas e atmosferas controladas para garantir a eficácia da infiltração (Konstanty, 2005).

Figura 1 - Vista em corte de conjuntos de moldes (a) brocas de superfície e (b) brocas TSP (ou híbridas TSP).



(a) (b)

Fonte: Konstanty (2005).

Finalmente, alguns componentes de ferramentas diamantadas necessitam de desbaste para remover resíduos de borda após a consolidação. A qualidade das ferramentas é frequentemente verificada por meio de testes de dureza, sendo o teste Rockwell B o mais comum. A densidade do produto final também é avaliada para garantir a integridade do material. Em brocas infiltradas, a verificação visual e técnicas não destrutivas, como radiografia, são utilizadas para garantir a correta configuração e protrusão dos diamantes, além de detectar falhas internas (Konstanty, 2003).

A seleção da matriz metálica é crucial para o desempenho das ferramentas diamantadas, desempenhando duas funções básicas: manter os diamantes firmemente fixos e desgastar-se a uma taxa compatível com a perda dos diamantes (Konstanty, 2003).

De acordo com Kumar *et al.* (2020), a resistência ao desgaste da matriz deve corresponder à abrasividade do material da peça para evitar que os diamantes se percam prematuramente. Uma matriz muito macia desgasta-se mais rápido que o diamante, resultando em perda prematura do mesmo. A capacidade de corte e a vida útil da ferramenta dependem das propriedades mecânicas, químicas e

tribológicas da matriz metálica. A matriz pode utilizar retenção mecânica ou uma combinação de retenção mecânica e química, sendo que a retenção química está em desenvolvimento para melhorar a eficácia. O processo de fabricação, incluindo a temperatura e a composição química da matriz, influencia a degradação do diamante. Diamantes sintéticos perdem força a temperaturas acima de 800°C, com a grafitização da superfície começando a cerca de 700°C (Artini, 2011).

O cobalto e suas ligas são amplamente utilizados como material base devido às suas propriedades de retenção de diamantes e resistência ao desgaste. Pós de cobalto maiores que 3 µm podem ser misturados com bronze para melhorar a densificação. Impurezas como oxigênio e enxofre podem afetar negativamente as propriedades da matriz, com o oxigênio aumentando a estabilidade da estrutura em altas temperaturas e o enxofre tornando o cobalto quebradiço. A demanda por alternativas ao cobalto surgiu devido a flutuações no fornecimento e no preço, levando ao desenvolvimento de pós com baixo teor ou sem cobalto, que estão sendo modificados para imitar seu desempenho (Konstanty, 2005).

A concentração de diamante é crucial e deve ser ajustada conforme o material a ser processado. Grãos mais finos são mais fortes e recomendados para materiais duros, enquanto grãos mais grossos são usados para remoção rápida de material. Revestimentos finos de carboneto, como titânio e cromo, melhoram a retenção dos diamantes e a vida útil da ferramenta, mas a fabricação inadequada pode levar à falha do revestimento. A distribuição de tamanho e a quantidade de impurezas dos pós metálicos são importantes na escolha da matriz metálica correta para garantir que a ferramenta funcione de maneira eficiente e durável (Konstanty, 2005).

A microestrutura de um material é crucial para suas propriedades, como resistência, dureza e desgaste. Entender a relação entre suas propriedades, as condições de processamento e a microestrutura do produto consolidado é essencial. A densificação quase total da matriz, onde os grãos de diamante são incorporados, é fundamental para o bom desempenho da ferramenta. Pós mais finos geralmente facilitam a densificação, e aditivos como bronze pré-ligado ou cobre podem reduzir a temperatura e a pressão necessárias durante a prensagem. No entanto, pós de tungstênio e carboneto de tungstênio exigem condições mais rigorosas. Além disso, a interação da matriz com o diamante a altas temperaturas pode causar degradação dos cristais de diamante, especialmente se a matriz contiver oxigênio (Konstanty, 2005).

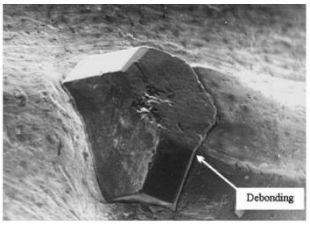
O tamanho dos grãos na matriz também influencia a resistência mecânica, com tamanhos menores proporcionando maior resistência devido ao fortalecimento por grãos finos. Durante o processamento, a recuperação ocorre a temperaturas mais baixas, aliviando a tensão na matriz, enquanto a recristalização, que elimina a dureza, ocorre a temperaturas mais altas. A presença de óxidos pode impactar a nucleação e o crescimento de novos grãos. No processo de sinterização a frio, a estrutura da fase e a formação de poros afetam a densificação e as propriedades finais do material (Konstanty, 2005).

As interações entre diamante e matriz ocorrem de várias formas, dependendo do tamanho e formato de cada partícula, sua orientação, condições de carga, tensões residuais na matriz, atrito, etc. O conhecimento teórico evoluiu a partir de modelos simplistas, mas ainda não oferece uma explicação satisfatória para os eventos de remoção de diamante na prática industrial (Konstanty, 2005).

A resposta mecânica da matriz, sob força pulsante com intensidade variável, é afetada por propriedades de fadiga sob condições de carga complexas e temperaturas moderadamente elevadas. Tensões internas ao redor de cada partícula de diamante surgem durante o processo de fabricação, devido a coeficientes de expansão térmica desajustados, o que pode melhorar a retenção, mas é difícil quantificar sua contribuição (Konstanty, 2005).

É crucial manter o estado pré-tensionado da matriz para evitar que os diamantes fiquem soltos e caiam prematuramente conforme demostrado na Figura 2.

Figura 2 – Deslocamento entre diamante e a matriz.



Fonte: Konstanty (2005).

Características como dureza, resistência ao escoamento e resistência ao impacto controlam a capacidade da matriz de reter os grãos de diamante. A avaliação dessas propriedades tornou-se prática industrial rotineira, apesar de ainda não haver consenso sobre sua relevância prática.

A dureza da matriz é influenciada por sua composição e pelo processo de consolidação do pó. Quando a densificação é incompleta, a dureza pode estar fora da faixa especificada. A resistência ao escoamento é importante para a retenção do diamante, sendo afetada por vários fatores, como a fase de óxidos e o tamanho das partículas de pó. A resistência à flexão é avaliada para verificar a integridade do material sinterizado e a eficácia de revestimentos aplicados aos diamantes (Konstanty, 2005).

A resistência ao impacto é crucial para manter a retenção do diamante diante de impactos intensos e abusos das ferramentas. A densidade, composição química, tamanho dos grãos e outras características influenciam a resistência ao impacto dos materiais. A absorção de deformação é essencial para evitar rachaduras na matriz devido a grandes deformações geradas pelas bordas afiadas dos diamantes (Dudek, 2003).

Sendo assim, podemos dizer que a fixação do diamante na matriz é uma questão influenciada por diversos fatores que devem ser considerados para garantir a eficácia e durabilidade das ferramentas diamantadas na indústria. É fundamental compreender as interações entre diamante e matriz, bem como as propriedades da matriz, a fim de garantir um bom funcionamento das ferramentas.

Discussão

As ferramentas diamantadas desempenham um papel fundamental em diversas aplicações industriais, desde o corte de materiais duros até a perfuração de rochas e concreto. Historicamente, ligas de cobalto e outras ligas não ferrosas dominaram o mercado devido à sua excelente capacidade de retenção de diamantes e resistência ao desgaste. No entanto, a escassez e os altos custos do cobalto levaram à busca por alternativas mais econômicas e sustentáveis, destacando as matrizes ferrosas como uma opção viável.

Este artigo revisa os avanços na utilização de matrizes ferrosas em ferramentas diamantadas, explorando métodos de fabricação como sinterização a alta pressão e temperatura. A principal vantagem das matrizes ferrosas reside na sua capacidade de oferecer propriedades mecânicas adequadas a um custo significativamente menor. No entanto, desafios importantes permanecem, como a aderência entre o diamante e a matriz, que influencia diretamente a durabilidade das ferramentas.

A revisão de literatura apresentada enfatiza que, apesar dos progressos, as matrizes ferrosas ainda não alcançaram o desempenho ideal quando comparadas às ligas de cobalto. A adesão do diamante à matriz ferrosa continua sendo um obstáculo, especialmente em condições operacionais adversas, onde a resistência ao desgaste é crucial. Vários estudos revisados indicam que o aprimoramento da interação entre o diamante e a matriz, por meio de técnicas avançadas de sinterização e tratamentos superficiais, é uma área promissora para futuras pesquisas.

Outro aspecto abordado é o impacto ambiental e econômico do uso de matrizes ferrosas. A substituição de ligas de cobalto por matrizes ferrosas não apenas reduz custos, mas também minimiza a dependência de materiais escassos e ambientalmente problemáticos. Isso coloca as matrizes ferrosas como uma solução sustentável que pode atender às exigências crescentes por materiais mais "verdes" na indústria de ferramentas diamantadas.

Por fim, o artigo sugere que a colaboração entre a academia e a indústria será essencial para superar os desafios remanescentes e acelerar a inovação neste campo. Pesquisas futuras devem focar no desenvolvimento de ligas ferrosas que combinem alta durabilidade com eficiência de custo, além de explorar novas técnicas de fabricação que possam melhorar a adesão entre o diamante e a matriz.

Conclusão

Este artigo revisa os avanços no desenvolvimento de ferramentas diamantadas com matrizes ferrosas, uma área de crescente importância na indústria de materiais de corte. Embora as matrizes ferrosas ofereçam uma alternativa promissora às ligas não ferrosas, como o cobalto, desafios técnicos ainda persistem, principalmente no que se refere à otimização da aderência entre o diamante e a matriz e à resistência ao desgaste em condições extremas. A revisão destaca o progresso alcançado até o momento, mas enfatiza a necessidade de inovação contínua para superar essas barreiras.

As ferramentas diamantadas com matrizes ferrosas apresentam potencial significativo para redução de custos e impacto ambiental, mas a pesquisa futura deve focar no desenvolvimento de novas ligas e processos de sinterização que maximizem a durabilidade e a eficiência dessas ferramentas. A colaboração entre a pesquisa acadêmica e as demandas da indústria será crucial para promover avanços que possam transformar as matrizes ferrosas em uma solução dominante no mercado de ferramentas diamantadas.

Referências

ARTINI, C.; MUOLO, M. L.; PASSERONE, A. Diamond–metal interfaces in cutting tools: a review. **Journal of Materials Science**, v. 47, p. 3252–3264, 2012.

BAERT, M. Coating of diamonds and granulation of metal powders. In: Proceedings of Seminar on PM Diamond Tools. Lausanne: Switzerland, November 2–3, 1995. p. 24–40.

BONNEAU, M.; MOLTENNI, M. Wire manufacturing and free sintering with NEXT. **Industrial Diamond Review**, v. 62, n. 4, p. 263–265, 2002.

CHALUS, P. A.; KONSTANTY, J. Diamond tooling. Stone cutting. **Cobalt News**, n. 4, p. 12–17, 1996.

DUDEK, K.; PIETRZYK, M.; KONSTANTY, J. **Analiza stanu napre_z. enia w otoczeniu kryszta u diamentu w segmencie metaliczno-diamentowym**. In: Proceedings of 10th Conference on Computer Science in Metal Technology. Wis a Jawornik, Poland, 2003. p. 95–102.

KIMURA, K. Method for forming metal-coated abrasive grain granules. **US Patent** 4,770,907, 13 Sept. 1988.

KUMAR, Deepak; DWARAPUDI, Srinivas; SISTA, Kameswara Srikar; SINHA, Gourav Ranjan. Iron powder-based metal matrix for diamond cutting tools: a review. **Researcher, R&D Tata Steel**, Jamshedpur-831001, Jharkhand, India,2020.

KONSTANTY, Janusz. Powder Metallurgy Diamond Tools. **Faculty of Metallurgy and Materials Science**, AGH University of Science and Technology, 2005. Krakow, Poland.

KONSTANTY, Janusz. **Cobalt as a Matrix in Diamond Impregnated Tools for Stone Sawing Applications**. Krakow: AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, 2003. 2nd Edition.

KONSTANTY, Janusz. The materials science of stone sawing. **Industrial Diamond Review**, v. 51, n. 1, p. 27–31, 1991.

MORIYA, N. Granulating apparatus. **US Patent** 4,655,701, 7 Apr. 1987.

TÖNSHOFF, H. K.; SCHULZE, R. The effect of the coolant in the sawing of hard stone. **Industrial Diamond Review**, v. 40, n. 4, p. 252–257, 1980.

TÖNSHOFF, H. K.; HILLMANN-APMANN, H.; ASCHE, J. Diamond tools in stone and civil engineering industry: cutting principles, wear and applications. **Diamond and Related Materials**, v. 11, p. 736–741, 2002.