

Inovação no desempenho de fluidos de corte: nanopartículas de prata e de óxido de zinco como aditivos multifuncionais

*Innovation in cutting fluid performance: silver and zinc oxide nanoparticles as
multifunctional additives*

SARAH CRISTINA MAGALHÃES MACHADO

Discente de Engenharia Mecânica (UNIPAM)
sarahcristina@unipam.edu.br

HUGO CAMPOS LIMA SILVA

Bacharel em Engenharia Mecânica (UNIPAM)
hugocls@unipam.edu.br

SANDRA LÚCIA NOGUEIRA

Professora orientadora (UNIPAM)
sandrln@unipam.edu.br

Resumo: A utilização de fluidos de corte é uma prática indispensável nos processos industriais de usinagem, garantindo a eficiência e a qualidade de peças. A busca por soluções inovadoras, como a nanotecnologia, é fundamental para aumentar a competitividade no setor. Este artigo tem como objetivo analisar o uso de nanopartículas como aditivos para fluidos de corte, avaliando suas propriedades e sua eficiência. Foram sintetizadas e caracterizadas nanopartículas de prata e de óxido de zinco, posteriormente incorporadas aos fluidos de corte. As amostras passaram por análises de pH, viscosidade e condutividade. A análise experimental desses valores demonstrou um aumento no pH das amostras, que permaneceu básico, indicando ausência de atividade microbiana nelas, um aumento na condutividade elétrica, associada a uma maior capacidade de dissipar calor gerado no processo de usinagem, e maior viscosidade, favorecendo a diminuição da temperatura de corte na usinagem e de forças envolvidas nesse processo.

Palavras-chave: fluidos de corte; nanopartículas; usinagem.

Abstract: The use of cutting fluids is an essential practice in industrial machining processes, ensuring both efficiency and product quality. The search for innovative solutions, such as nanotechnology, is crucial to increasing competitiveness in the sector. This study aims to analyze the use of nanoparticles as additives for cutting fluids, evaluating their properties and efficiency. Silver and zinc oxide nanoparticles were synthesized and characterized, then incorporated into cutting fluids. The samples were subjected to pH, viscosity, and conductivity analyses. Experimental evaluation of these parameters showed an increase in pH, which remained basic, indicating the absence of microbial activity in the samples; an increase in electrical conductivity, associated with a higher capacity to dissipate heat generated during machining; and higher viscosity, contributing to reduced cutting temperature and decreased forces involved in the machining process.

Keywords: cutting fluids; nanoparticles; machining.

1 INTRODUÇÃO

A utilização de fluidos de corte é uma prática indispensável nos processos industriais de usinagem, sendo fundamentais para garantir a eficiência e a qualidade na produção de peças. Eles atuam como lubrificantes, reduzindo o atrito entre a ferramenta e a peça, o que evita o superaquecimento e o desgaste excessivo nos processos de fabricação. Além disso, esses fluidos têm a capacidade de dissipar o calor gerado durante o corte, o que é fundamental para prevenir danos térmicos às peças usinadas e às ferramentas. Outra propriedade importante é a capacidade de remover as partículas e cavacos gerados durante a usinagem, mantendo a área de corte limpa e proporcionando uma maior precisão no processo. Também se espera que o fluido previna a oxidação e demais corrosões das peças e ferramentas durante o processo de usinagem (Kiminami; Castro; Oliveira, 2013, p. 112).

Como descrito por Machado, Coelho e Abrão (2015, p. 185), “Tratando-se de sistemas de manufatura, qualquer esforço para aumentar a produtividade e/ou reduzir custos deve ser considerado”. Nesse contexto, é de se esperar que um elemento tão importante quanto o fluido de corte seja alvo de constante aprimoramento. A otimização das propriedades mecânicas desses fluidos é fundamental para obter resultados eficientes e de alta qualidade na usinagem e, portanto, a tecnologia de fluidos de corte é pressionada pelo próprio mercado a requerer uma constante evolução, sendo necessário aprimorar a capacidade de lubrificação e condução térmica e elétrica dos fluidos de corte para maximizar sua eficiência durante o processo de usinagem.

Uma alternativa com potencial para solucionar as problemáticas apresentadas é a nanotecnologia, através do uso de nanopartículas como aditivo aos fluidos de corte, devido às suas aplicações promissoras. No setor industrial, por exemplo, as nanopartículas de prata têm sido investigadas como alternativas de lubrificação viáveis e vêm mostrando resultados positivos, como pesquisado pelos autores Melo e Nogueira (2021). Além da capacidade lubrificante, em outro estudo, Pessoa e Nogueira (2022) concluíram que o uso de nanopartículas de prata não agride o meio ambiente, pelo contrário, tem um impacto positivo sobre o solo e as plantas. Esses fatos estudados e comprovados cientificamente, contribuem para descrever as nanopartículas de prata como um eficiente lubrificante, que, além de eficaz, não prejudica o meio ambiente, podendo ter o seu descarte facilitado e reduzindo custos e riscos com contaminações ao ser humano.

Um outro tipo de nanopartícula que é amplamente utilizado no setor industrial são as nanopartículas de óxido de zinco. Essas nanopartículas são altamente aplicadas como agente antimicrobiano e antifúngico, como relatado por Porto *et al.* (2017). Ademais, o óxido de zinco é uma composição química estável e inerte e, por conta disso, não demonstra reatividade significativa em condições normais de temperatura e pressão, tornando o seu uso comum na indústria química (Mayrinck *et al.*, 2014).

Partindo-se das propriedades específicas já consolidadas pela literatura, o uso das nanopartículas de prata e de óxido de zinco como aditivos para fluidos de corte pode oferecer benefícios notáveis, incluindo ações antimicrobianas eficazes contra diversos tipos de microrganismos que contaminam os fluidos de corte. Acrescenta-se a isso o

potencial de melhorar a capacidade de lubrificação e condução térmica e elétrica dos fluidos, tornando-os mais eficientes e aumentando a sua vida útil.

Em síntese, cria-se a hipótese de que a utilização dessas nanopartículas como aditivos aos fluidos de corte pode ser uma estratégia inovadora e promissora para enfrentar os desafios associados ao desempenho desses fluidos, melhorando a capacidade de lubrificação e condução térmica, e tornando o processo de usinagem mais seguro, econômico, sustentável e eficiente. Dessa forma, o presente estudo objetiva analisar o potencial do uso de nanopartículas de prata e de óxido de zinco como aditivos para fluidos de corte em processos de usinagem, avaliando suas propriedades mecânicas e sua eficiência. Busca-se a caracterização desses nanomateriais e a avaliação de sua estabilidade e suas propriedades, comparando valores de pH, viscosidade e condutividade em relação ao fluido base.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 NANOTECNOLOGIA E NANOPARTÍCULAS METÁLICAS

A nanotecnologia é uma ciência que estuda a manipulação da matéria em uma escala atômica e molecular, lidando com estruturas denominadas nanopartículas (NPs), que possuem dimensões em escala nanométrica, ou seja, o seu tamanho varia entre 1 e 100 nanômetros ($1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$). Essas partículas têm propriedades físicas e químicas únicas, diferentes das partículas em escalas maiores do mesmo material. Devido ao seu tamanho reduzido, as nanopartículas podem exibir um aumento significativo na relação superfície-volume, tornando-as altamente reativas e potencialmente influenciando as suas propriedades e comportamentos (Toma; Condomitti, 2016).

Entre os nanomateriais mais estudados estão as nanopartículas metálicas. Elas têm despertado interesse devido à elevada condutividade térmica e elétrica, estabilidade química e alta atividade antimicrobiana (Naikoo *et al.*, 2021). Quanto ao desenvolvimento de nanoestruturas com propriedades antibacterianas, é possível encontrar na literatura estudos envolvendo o uso de nanopartículas de prata (Ag-NPs) e de óxido de zinco (ZnO-NPs), principalmente. As ZnO-NPs são efetivas no controle de uma grande quantidade de microrganismos, pois tem a capacidade de alterar os componentes da membrana celular da bactéria, fazendo-a romper, o que causa a perda do componente intracelular e, conseqüentemente, a morte do microrganismo (Porto *et al.*, 2017). Além de possuírem as propriedades mencionadas, as Ag-NPs também apresentaram resultados promissores na transferência de calor, demonstrando grande potencial para serem aplicadas em fluidos de refrigeração comercial (Santos, 2019).

2.2 FLUIDOS DE CORTE

Os fluidos de corte são empregados nas operações de usinagem para melhorar os processos tribológicos que ocorrem quando as superfícies da peça e da ferramenta entram em contato. Eles têm como principais funções: lubrificar a baixas velocidades de corte, refrigerar a altas velocidades, remover os cavacos da zona de usinagem e proteger a máquina-ferramenta e a peça contra a oxidação (Machado; Coelho; Abrão, 2015, p. 187).

No entanto, alguns problemas estão relacionados ao uso desses fluidos, como a contaminação por microrganismos, que provocam uma alteração em seus componentes, tornando-os impróprios para o uso, reduzindo a sua vida útil e acarretando a necessidade de seu descarte. Além disso, essa contaminação gera riscos à saúde dos operadores, ocasionando principalmente infecções dermatológicas e respiratórias (Grespan, 2020).

O uso de nanopartículas em fluidos de corte tem mostrado um aumento em suas propriedades lubrificantes e refrigerantes, reduzindo a força de usinagem, a temperatura de corte, a rugosidade da peça, o coeficiente de atrito e o desgaste das ferramentas de corte. Nanopartículas de 5 a 100 nm são geralmente dispersas em fluido de corte de base vegetal, o que melhora significativamente as propriedades tribológicas do nanofluido e a usinabilidade de ligas metálicas (Baldin, 2022).

2.3 SÍNTESE DE NANOPARTÍCULAS

Os nanomateriais podem ser obtidos por duas abordagens: *bottom up* (“de baixo para cima”), em que os materiais se constroem a partir de átomos ou moléculas, ou *top-down* (“de cima para baixo”), em que há a quebra de um material que irá ser trabalhado em nanopartículas, com o uso de técnicas específicas. Partindo da primeira abordagem, um dos métodos mais comuns para obter nanopartículas metálicas é através da redução química, que geralmente utiliza três componentes principais: precursores metálicos, agentes redutores e agentes estabilizantes, sendo os últimos utilizados para evitar a aglomeração indesejada das partículas no fim da reação. A redução dos sais é composta pelas fases de nucleação e crescimento, respectivamente (Ju-Nam; Lead, 2008). As sínteses via *bottom up* têm se mostrado mais viáveis, pois desempenham um melhor controle de importantes propriedades, como distribuição de tamanho e morfologia, além de utilizarem procedimentos mais acessíveis e sem a demanda de equipamentos complexos (Chhabra *et al.*, 2018).

As nanopartículas de óxido de zinco podem ser obtidas pela rota de síntese sol-gel, em que ocorre uma transição do sistema sol (suspensão de partículas coloidais com dimensão entre 1 e 1000 nm) para um sistema gel (estrutura rígida de partículas coloidais - gel coloidal), formando agregados esféricos (Mayrinck *et al.*, 2014). Entre os métodos de síntese sol-gel mais utilizados, destaca-se a rota dos precursores poliméricos (Método de Pechini). Ele consiste na formação de uma resina polimérica, produzida pela poliesterificação entre um complexo metálico quelatado, usando ácidos hidroxicarboxílicos e um álcool polihidroxilado. Durante o aquecimento em temperaturas controladas, ocorrem as reações de esterificação e poliesterificação, formando assim uma resina polimérica e água. Após a secagem, o polímero formado apresenta grande homogeneidade e deve ser submetido a um tratamento térmico adequado para a eliminação da parte orgânica e obtenção da fase desejada (Pechini, 1967).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização dos objetivos propostos, foi desenvolvida uma pesquisa experimental, com a manipulação de variáveis independentes (causas antecedentes), para uma posterior análise das consequências dessa manipulação sobre as variáveis dependentes (efeitos consequentes). A pesquisa teve um enfoque quantitativo, através da coleta de dados para testar hipóteses, baseando-se na medição numérica e na análise estatística para estabelecer padrões e comprovar teorias. Ela também teve caráter qualitativo e envolveu a combinação de estudos exploratórios e descritivos, identificando conceitos promissores e perspectivas inovadoras através da especificação de propriedades, características e traços importantes de um determinado fenômeno (Sampieri; Collado; Lucio, 2013, p. 30-141).

3.1 SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DAS NANOPARTÍCULAS DE PRATA E DE ÓXIDO DE ZINCO

As nanopartículas de prata foram sintetizadas pelo método *Bottom Up*, utilizando os seguintes reagentes: nitrato de prata (AgNO_3), borohidreto de sódio (NaBH_4) e ácido cítrico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$). Primeiramente, foram preparados 75 mL de solução $2,0 \times 10^{-3}$ mol. L^{-1} de borohidreto de sódio. O recipiente passou por banho de gelo por um período de 15 minutos. Em seguida, com o auxílio de uma bureta, a uma taxa de 1 gota/s, foram adicionados 25 mL de solução $1,0 \times 10^{-3}$ mol. L^{-1} de nitrato de prata, com o objetivo de encontrar uma solução amarelada. O sistema foi composto por uma barra magnética, a fim de levá-lo à agitação por 15 minutos (Pessoa; Nogueira, 2022).

As nanopartículas de óxido de zinco foram obtidas pelo método dos precursores poliméricos (Método de Pechini), conforme a bibliografia. Para isso, foram utilizados os seguintes reagentes e suas respectivas proporções em massa: ácido cítrico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) - 47,7%, etilenoglicol ($\text{C}_2\text{H}_4(\text{OH})_2$) - 20,6%, nitrato de zinco hexa-hidratado ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) - 31,7% e água destilada. As massas dos reagentes foram medidas em uma balança analítica e as temperaturas foram aferidas com um termômetro analógico. A síntese foi realizada em uma capela de exaustão devido aos gases liberados no processo. Inicialmente, o etilenoglicol foi aquecido sob constante agitação, em um agitador magnético, à temperatura de 70°C. Posteriormente, o ácido cítrico e o nitrato de zinco hexa-hidratado foram diluídos neste líquido e, em seguida, foi adicionada a água destilada. Após atingir uma certa temperatura, formou-se um gel ou resina polimérica. Essa resina foi levada para um forno mufla em uma temperatura de 500°C por 12 horas, ocorrendo o processo de calcinação (Castro *et al.*, 2022).

Para a caracterização de ambas as nanopartículas, as soluções tiveram o seu espectro eletrônico medido, bem como o comprimento de onda de máxima absorção. Para isso, foi utilizado um espectrofotômetro de absorção de UV-visível (Pessoa; Nogueira, 2022). Para as NPs de óxido de zinco, houve diluição (0,01g de sólidos para 100,0 mL de água destilada) antes de efetuar análise UV-vis. A solução foi colocada em um béquer de 100 ml e levada ao banho de ultrassom por uma hora, no laboratório de ciência e tecnologia dos materiais, a fim de se obter uma mistura homogênea (Porto *et al.*, 2017).

3.2 SÍNTESE DE NANOFLUIDOS

A síntese de nanofluidos para a incorporação das nanopartículas nos fluidos de corte foi baseada no método de dois passos, em que as nanopartículas em solução coloidal e em forma de pó foram dispersas nas amostras de fluido base. Foram consideradas as concentrações de 0,01% de nanomaterial sólido e 10% de nanomaterial líquido. Inicialmente, as massas das amostras de nanopartículas foram medidas em uma balança analítica. Em seguida, elas foram adicionadas ao fluido base com o auxílio de um agitador magnético e a mistura resultante foi submetida ao procedimento de vibração ultrassônica ou banho de ultrassom (sonicador) para obtenção do nanofluido (Oliveira, 2018).

3.3 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DOS FLUIDOS DE CORTE

Os fluidos de corte tradicionais (por aplicação em jato) podem ser divididos em três grupos: óleos, emulsões e soluções (Machado; Coelho; Abrão, 2015, p. 187-192). Para todos os testes e ensaios realizados, foram adotadas quatro populações de fluido:

1. fluido de corte sintético;
2. fluido de corte sintético com nanopartículas de prata;
3. fluido de corte sintético com nanopartículas de óxido de zinco;
4. fluido de corte sintético misto (nano-aditivos de prata e óxido de zinco).

Essa metodologia foi adaptada de Sales (1999) e tem o objetivo de representar populações distintas de fluidos.). A opção por reduzir o escopo a esses tipos de fluidos se deu para tornar a pesquisa mais eficiente e a escolha específica de suas composições se deu pelo uso deles na região onde se executou a pesquisa. Assim sendo, sua obtenção foi de fácil acesso aos pesquisadores e os resultados obtidos foram mais relevantes à região de origem do estudo.

3.4 MÉTODOS DE QUANTIFICAÇÃO E QUALIFICAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS FLUIDOS

Para Machado, Coelho e Abrão (2015, p. 185), as principais características para um fluido de corte são refrigeração, lubrificação, viscosidade, e ausência de contaminação. Delimitado o escopo, faz-se necessário então a aquisição e a análise de dados específicos para quantificar e qualificar algumas dessas características. Também foi monitorado o pH (potencial hidrogeniônico) das amostras, uma vez que ele tem ligação direta à suscetibilidade de contaminação microbiológicas do fluido e no seu potencial corrosivo.

Para a análise do pH, foram realizadas medições em um *pHmetro* MS Tecnopon, mPA-210, assim como exposto por Postal (2016). A capacidade de refrigeração depende de vários fatores, como a sua condutividade elétrica e dureza, que geralmente estão associadas a uma maior capacidade de dissipar calor gerado no processo de usinagem. Visando-se obter informações relacionadas à dureza das

amostras, fator de fundamental importância para a estabilidade de emulsões, foram realizados ensaios de condutividade em um condutivímetro MS Tecnozon, mCA 150P. A dureza, que pode ser correlacionada com a sua respectiva condutividade (Postal, 2016), mostra-se como um fator que contribui para o aumento da instabilidade de emulsões, entre elas aquelas preparadas utilizando-se fluidos de corte.

Por fim, para a obtenção dos valores de viscosidade das diferentes amostras foi utilizado um viscosímetro rotativo analógico Q860A21, cujas medições dependem da termostatização das amostras (Postal, 2016). A medição foi realizada com o uso do rotor 0 do equipamento, utilizado para líquidos de baixa viscosidade, e com velocidade de 30 rpm.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 SÍNTESE DE NANOPARTÍCULAS

4.1.1 Nanopartículas de prata

Durante o processo da síntese, com a adição controlada do nitrato de prata, a solução, ainda em agitação magnética e em banho de gelo, atingiu uma coloração cada vez mais amarelada, conforme o esperado e, ao final da reação, obteve um tom amarelo escuro, condizentes com os resultados reportados por Pessoa e Nogueira (2022). As Figuras 1 e 2 evidenciam a parte inicial e final da reação.

Figura 1: Coloração durante a síntese



Fonte: arquivo dos autores, 2024.

Figura 2: Coloração ao final da síntese



Fonte: arquivo dos autores, 2024.

4.1.2 Nanopartículas de óxido de zinco

A solução formada durante a reação adquiriu uma coloração amarelada após atingir a temperatura de 110°C, representada na Figura 3 e, aos 130°C, obteve uma

consistência de gel/resina, momento em que o aquecimento foi interrompido devido ao excesso de precipitação no béquer, conforme a Figura 4.

Figura 3: Coloração em 110°C



Fonte: Autoria Própria, 2024.

Figura 4: Aspecto ao final da reação



Fonte: Autoria Própria, 2024.

A resina obtida foi levada para um forno mufla a uma temperatura de 500°C por 12 horas, passando pelo processo de calcinação, em que houve a eliminação da parte orgânica e o surgimento de um material de aparência esponjosa, mas que é facilmente quebrável, originando as nanopartículas de óxido de zinco em forma de pó, conforme representado na Figura 5.

Figura 5: Nanopartículas na forma sólida



Fonte: arquivo dos autores, 2024.

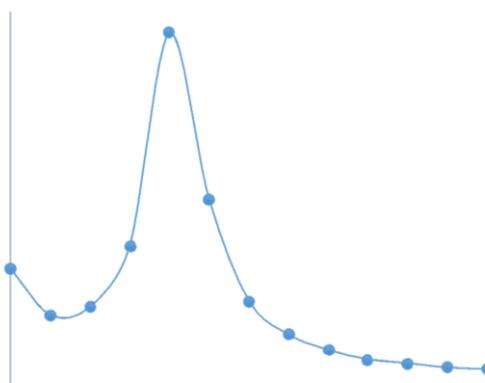
4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS NANOPARTÍCULAS

4.2.1 Nanopartículas de prata

A fim de caracterizar as nanopartículas de prata, utilizou-se o método da espectrofotometria de absorção, que consistiu em uma análise partindo do comprimento de onda de 200 nm até 800 nm, de modo a evidenciar a formação das AgNPs. A solução de nanopartículas foi colocada em uma cubeta de quartzo e levada a um espectrofotômetro de UV-vis Genesys 10uv. A amostra foi analisada logo após a sua preparação ($t = 0$) e 60 dias após a síntese. Dessa forma, foi possível comprovar que a solução se manteve estável.

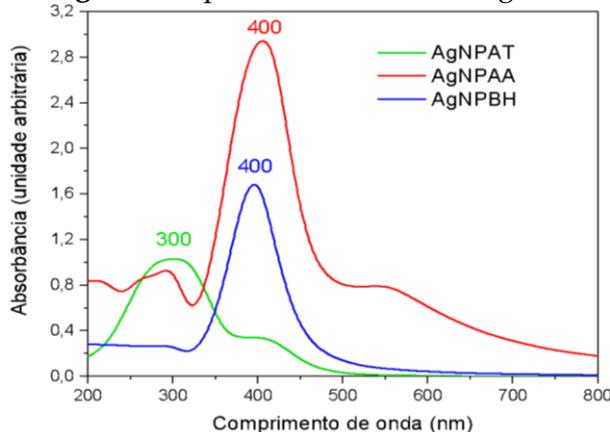
O comprimento de onda de máxima absorção se deu na faixa dos 400 nm, evidenciado na Figura 6, e permaneceu estável, uma vez que o borohidreto de sódio, adicionado em excesso em relação ao nitrato de prata (2:1), atua na estabilização das nanopartículas, além de ser um forte redutor na presença de íons prata, conforme evidenciado por Pessoa e Nogueira (2022), na curva em azul representada na Figura 7.

Figura 6: Espectro de UV-Vis das AgNPs



Fonte: dados da pesquisa, 2024

Figura 7: Espectro de UV-Vis de AgNPs

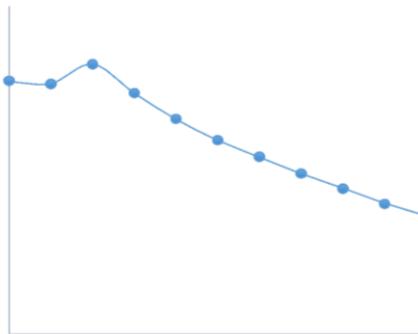


Fonte: Pessoa e Nogueira, 2022.

4.2.2 Nanopartículas de óxido de zinco

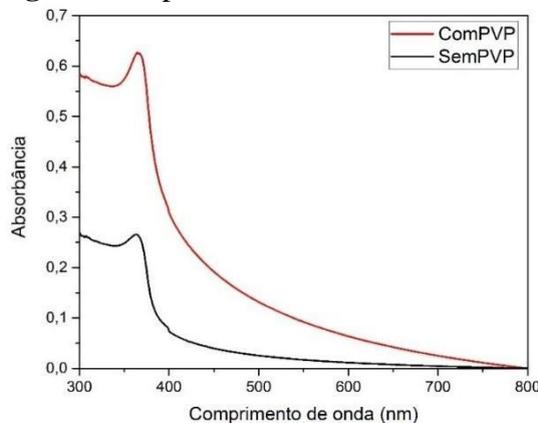
Após passar pelo banho de ultrassom para se homogeneizar, a solução de nanopartículas em pó e água destilada foi também colocada em uma cubeta de quartzo e submetida ao processo de espectrofotometria de absorção. A análise foi realizada partindo do comprimento de onda de 300 nm até 800 nm, conforme a Figura 8. O espectro da amostra apresentou resultados semelhantes aos de Porto *et al* (2017), tendo sua maior absorção próxima ao comprimento de onda de 400 nm, evidenciado na Figura 9 pela curva em preto.

Figura 8: Espectro de UV-Vis de ZnO NPs



Fonte: dados da pesquisa, 2024.

Figura 9: Espectro de UV-Vis de ZnO NPs



Fonte: Porto *et al*, 2017.

4.3 SÍNTESE DE NANOFLUIDOS

O fluido base utilizado foi o Fluido de Corte de base sintética isento de óleo mineral, fabricado pela Synergy, com concentração de 5-15%, miscível em água. As quatro amostras em estudo passaram por banho de ultrassom por 30 minutos, garantindo a homogeneização dos fluidos de corte nano-aditivados. Durante esse processo, a temperatura foi monitorada para que não ultrapassasse os 40°, que é a

temperatura máxima de estocagem recomendada pelo fabricante, a fim de não alterar a sua estabilidade. As quantidades utilizadas se encontram na Tabela abaixo.

Tabela 1: Concentrações dos fluidos e NPs para síntese de nanofluidos

Fluido de Corte	Água	AgNps	ZnONps
10 ml	90 ml	-	-
10 ml	80 ml	10 ml	-
11,1 ml	100 ml	-	0,0111 g
12,5 ml	100 ml	12,5 ml	0,0125 g

Fonte: dados da pesquisa, 2024.

A Figura 10 ilustra as soluções de fluido de corte e de água juntamente com nanopartículas de óxido de zinco em pó após o banho de ultrassom, que se apresentaram homogêneas ao final do processo.

Figura 10: Amostras em banho de ultrassom



Fonte: arquivo dos autores, 2024.

4.4 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DOS FLUIDOS DE CORTE

As propriedades das soluções de fluido de corte foram avaliadas logo após passarem pelo banho de ultrassom, momento em que todas se encontravam estáveis e homogêneas. Entretanto, após uma semana de armazenamento das amostras que continham nanopartículas de óxido de zinco em pó, observou-se que este nanomaterial havia se aglomerado no béquer, formando um precipitado sólido e demonstrando baixa afinidade para dispersão em água, observado na Figura 11. Ainda assim, a análise das propriedades mencionadas neste estudo foi possível, com medições realizadas imediatamente após o banho ultrassônico.

Figura 11: Aglomerado de nanopartículas de óxido de zinco



Fonte: arquivo dos autores, 2024.

4.4.1 Medição de pH

O pH das amostras foi medido submergindo o eletrodo do equipamento em um béquer contendo quantidade suficiente dos líquidos analisados. O pH previsto, segundo o fornecedor, para uma emulsão preparada com o fluido em questão está entre 8,7 e 9,5. O pH resultante da dispersão das soluções de fluidos de corte nano aditivados permaneceu básico, o que pode ser considerado como indicativo de ausência de atividade microbiana, assim como evidenciado por Postal (2016). Observando-se a Tabela 2, percebe-se que a amostra que apresentou o maior pH foi a que continha apenas nanopartículas de prata (AgNps) e as com resultado reduzido foram as que continham nanopartículas de óxido de zinco (ZnONps). Ainda assim, os valores de pH medidos experimentalmente permanecem dentro do intervalo esperado de emulsões de fluido de corte em geral (Postal, 2016).

Tabela 2: Valores de pH das amostras

Soluções	pH
Fluido + água	9,53
Fluido + AgNps	9,55
Fluido + ZnONps	9,38
Fluido + AgNps + ZnONps	9,34

Fonte: dados da pesquisa, 2024.

4.4.2 Medição de condutividade elétrica

Experimentalmente, observou-se na Tabela 2 um aumento na condutividade elétrica de fluidos que continham nanomateriais, em especial as nanopartículas de óxido de zinco (ZnONps). Esses dados de condutividade encontrados se relacionam à dureza das amostras, fator de fundamental importância para a estabilidade de emulsões. De

modo geral, os nanomateriais propiciaram um aumento na condutividade elétrica das soluções em comparação com os valores do fluido contendo apenas água, apresentando, assim, um grau ainda mais baixo de dureza. Além disso, uma maior condutividade em fluidos de corte também está associada a uma maior capacidade de dissipar calor gerado no processo de usinagem, pois fluidos condutores são geralmente mais eficazes na transferência de calor, reduzindo o aquecimento excessivo da peça e da ferramenta de corte, assim como evidenciado por Postal (2016).

Tabela 2: Valores de condutividade elétrica das amostras

Soluções	Condutividade [$\mu\text{S}/\text{cm}$]
Fluido + água	3,39
Fluido + AgNps	3,51
Fluido + ZnONps	4,75
Fluido + AgNps + ZnONps	4,80

Fonte: dados da pesquisa, 2024.

4.4.3 Medição de viscosidade

Para a medição foram realizadas 3 aferições de cada amostra, a fim de aumentar a confiabilidade dos resultados. O resultado final foi obtido pelo cálculo da média aritmética dos valores de cada amostra, que se encontram na Tabela 3. Observou-se que a solução que continha apenas nanopartículas de prata teve a sua viscosidade reduzida em relação ao fluido de corte puro diluído em água. Já a que continha somente nanopartículas de óxido de zinco obteve um aumento significativo em seus resultados. Por fim, a combinação de ambos os nanomateriais obteve a maior viscosidade média dentre as amostras em análise. O aumento da viscosidade favorece a diminuição da temperatura de corte na usinagem e de forças envolvidas no processo de corte (Postal, 2016).

Tabela 3: Valores de Viscosidade das amostras

Soluções	Viscosidade 1 [mPa.s]	Viscosidade 2 [mPa.s]	Viscosidade 3 [mPa.s]	Viscosidade Média [mPa.s]
Fluido + água	1,6	1,8	1,7	1,7
Fluido + AgNps	1,5	1,6	1,5	1,53
Fluido + ZnONps	2,9	2,9	3	2,93
Fluido + AgNps + ZnONps	3	3	3,1	3,03

Fonte: dados da pesquisa, 2024.

5 CONCLUSÃO

As sínteses de nanopartículas de prata (AgNPs) e de óxido de zinco (ZnO NPs), realizadas pelos métodos *bottom up* e Precursores Poliméricos, respectivamente, demonstraram-se eficientes, tendo a primeira formado uma suspensão coloidal e, a

segunda, nanopartículas na forma sólida, com resultados próximos à bibliografia apresentada. A caracterização das nanopartículas por espectrofotometria de absorção evidenciou picos característicos, confirmando a formação delas. Em ambas, foi observado um pico de absorção próximo a 400 nm.

Com base nos resultados das medições de algumas propriedades dos nanofluidos, conclui-se que a adição de nanopartículas de prata (AgNps) e de óxido de zinco (ZnONps) aos fluidos de corte apresentou efeitos positivos, melhorando parâmetros como condutividade elétrica, viscosidade e estabilidade do pH. Esses resultados indicam que os nanomateriais podem atuar como aditivos promissores, oferecendo maior eficiência térmica e redução das forças envolvidas no processo de usinagem. A combinação de ambos os nanomateriais demonstrou um desempenho interessante, obtendo a maior viscosidade, o que pode contribuir para o controle da temperatura de corte durante a usinagem.

No entanto, observou-se um desafio em relação à estabilidade a longo prazo das amostras contendo nanopartículas de óxido de zinco. Embora as soluções tenham se mostrado homogêneas e estáveis logo após o tratamento ultrassônico, a formação de precipitados sólidos durante o armazenamento evidencia a baixa afinidade dessas nanopartículas para dispersão em água. Esse comportamento sugere a necessidade de aprimoramentos no processo de dispersão ou na formulação dos fluidos de corte contendo ZnONps, visando garantir a estabilidade e a eficiência dos nanomateriais durante o uso prolongado.

Embora os resultados iniciais mostrem que o uso de nanopartículas pode melhorar o desempenho dos fluidos de corte, futuras pesquisas devem focar na melhoria da estabilidade desses materiais, especialmente no que diz respeito às nanopartículas de óxido de zinco, para viabilizar seu uso prático em escala industrial.

REFERÊNCIAS

BALDIN, Vitor *et al.* State of the Art of Biodegradable Nanofluids Application in Machining Processes. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, [S. l.], 30 nov. 2022. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40684-022-00486-0#article-info>.

CASTRO, T.J. *et al.* Size controlling and tailoring the properties of Gd Zn1-O nanoparticles. **Ceramics International**, [S. l.], v. 48, n. 3, p. 4324-4331, fev. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0272884221033794?via%3Dihub#preview-section-cited-by>.

CHHABRA, Varun A. *et al.* Synthesis and spectroscopic studies of functionalized graphene quantum dots with diverse fluorescence characteristics. **Rsc Advances**, [S. l.], v. 8, n. 21, p. 11446-11454, mar. 2018. Royal Society of Chemistry (RSC). Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2018/ra/c8ra01148f>.

GRESPLAN, Gilberto Henrique. Novas tecnologias na formulação de fluidos de corte solúveis com redução na contaminação microbiana. **Itw Chemical**, 2020. Disponível em: https://itwcpf.com.br/wp-content/uploads/2021/06/Fluidos_Artigo-Tecnico-Fluidos-de-Corte-Contaminacao-microbiana-Nov20.pdf.

JU-NAM, Yon; LEAD, Jamie R. Manufactured nanoparticles: an overview of their chemistry, interactions and potential environmental implications. **Science Of The Total Environment**, [S. l.], v. 400, n. 1-3, p. 396-414, ago. 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969708006943>.

KIMINAMI, Claudio S.; CASTRO, Walman Benício de; OLIVEIRA, Marcelo Falcão de. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. São Paulo: Editora Blucher, 2013. *E-book*. ISBN 9788521206835.

MACHADO, Álisson R.; COELHO, Reginaldo T.; ABRÃO, Alexandre M. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Editora Blucher, 2015. *E-book*. ISBN 9788521208440.

MAYRINCK, Caroline *et al.* Síntese, Propriedades e Aplicações de Óxido de Zinco Nanoestruturado. **Revista Virtual de Química**, [S. l.], v. 6, n. 5, p. 1185-1204, 07 out. 2014. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). Disponível em: <https://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/629>.

MELO, Lorrana Magalhães; NOGUEIRA, Sandra Lúcia. Análise teórica sobre a inserção de nanopartículas em óleo lubrificante para a diminuição do desgaste em superfícies sólidas. **Perquirere: Engenharias, Ciências Exatas e da Terra**, Patos de Minas, v. 2, n. 18, 22 dez. 2021. Disponível em: <https://revistas.unipam.edu.br/index.php/perquirere/article/view/2605>.

NAIKOO, Gowhar A. *et al.* Bioinspired and green synthesis of nanoparticles from plant extracts with antiviral and antimicrobial properties: a critical review. **Journal of Saudi Chemical Society**, [S. l.], v. 25, n. 9, p. 101304, set. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319610321001095>.

OLIVEIRA, Letícia Raquel de. **Síntese e caracterização de nanofluidos para aplicação em sistemas térmicos**. 2018. 250 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/21077>.

PECHINI, M. P. **Method of preparing lead an alkaline earth titanates na nionates and coating method using the same from a capacitor**. U. S. n. 3330697. Concessão: 1967.

PESSOA, Isabella Cristine de Deus; NOGUEIRA, Sandra Lúcia. **Síntese de nanopartículas de prata e análise da sua influência na potencialização do desenvolvimento vegetal da soja**. 2022. 21 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Centro Universitário de Patos de Minas - UNIPAM, Patos de Minas, 2022.

PORTO, Renato Cesar Tobias *et al.* Nanopartículas de óxido de zinco sintetizadas pelo método poliol: caracterização e avaliação da atividade antibacteriana. **Matéria** (Rio de Janeiro), [S. l.], v. 22, n. 1, 2017. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/NknWMVjTYKZKWbTJcS3M3q/#>.

POSTAL, Victor. **Estudo da manipulação térmica de emulsões via espectroscopia UV-Vis aplicada a fluidos de corte**. 2016. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-23012017-113619/en.php>.

SALES, W. F. **Influência das características refrigerantes e lubrificantes de fluidos de corte**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia, 1999.

SAMPIERI, Roberto Hernández; COLLADO, Carlos Fernández; LUCIO, María del Pilar Baptista. **Metodologia de Pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Penso, 2013.

SANTOS, Caio Carvalho dos. **Síntese de nanopartículas de prata e cobre: preparação e estabilidade coloidal de nanofluidos em meio aquoso**. 2019. 141 f. Tese (Doutorado) - Curso de Química, Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista - Unesp, Araraquara, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/183581>.

TOMA, Henrique E.; SILVA, Delmárcio Gomes da; CONDOMITTI, Ulisses. **Nanotecnologia experimental**. São Paulo: Editora Blucher, 2016. *E-book*. ISBN 9788521210672.