

APLICAÇÃO DE NANOLUBRIFICANTES PARA USINAGEM: UMA REVISÃO

Wender Teixeira de Almeida, wendermv@gmail.com¹

Valdicleide Silva e Mello, valdkqi@hotmail.com¹

Salete Martins Alves, saletealves@ect.ufrn.br¹

Adilson José de Oliveira, adilson@ct.ufrn.br¹

¹ Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Av. Senador Salgado Filho, 3000, Campus Universitário – Lagoa Nova, CEP 59078-970, Natal/RN – Brasil.

Resumo: Um dos métodos mais amplamente utilizados no segmento de produção na indústria é a usinagem. Neste processo os fluidos de corte representam um papel fundamental nos parâmetros que influenciam um desempenho satisfatório no processo de fabricação. Os estudos na área de fluidos de cortes têm se intensificado especialmente nos chamados nanofluidos, pois eles demonstram grande potencial na transferência de calor por apresentarem propriedades térmicas e tribológicas superiores quando comparadas aos fluidos convencionais. Esta pesquisa tem como principal objetivo revisar os parâmetros de maior influência das características das nanopartículas que são usadas em fluidos de corte, bem como, os efeitos benéficos dos nanofluidos nos processos de usinagem. Uma análise mais detalhada da revisão em usinagens com nanofluidos com maior concentração de partículas permite observar um melhoramento nas características como acabamento superficial e efeito de aumento de superfície de nanopartículas quando comparado a usinagem com fluido de corte convencional. Outros fatores como a redução no coeficiente de atrito, menor desgaste da ferramenta, diminuição da força de corte e menor consumo de energia no processo, também são observados. Desta forma o estudo esclarece as perspectivas futuras no contexto do uso de nanofluidos nos processos de usinagem, bem como as lacunas existentes que propiciarão pesquisas futuras.

Palavras-chave: usinagem, nanofluidos, nanopartículas

1. INTRODUÇÃO

A usinagem é um dos processos de fabricação mais amplamente utilizados pela indústria metal-mecânica. Essa forma de manufatura tem alcançado grandes avanços pelo acelerado desenvolvimento dos materiais e das máquinas-ferramentas. Embora haja desenvolvimento constante, o calor gerado no processo de usinagem, persiste em afetar negativamente alguns pontos como redução da vida útil da ferramenta, aumento da rugosidade superficial e diminuição da sensibilidade dimensional do material trabalhado. Uma das alternativas para minimizar os danos causado pelo calor gerado consiste na aplicação de fluidos de corte no processo de usinagem (Mamidi e Xavier, 2014). Eles são usados com o objetivo de lubrificar e resfriar as áreas em contato entre a ferramenta de corte e a peça e a ferramenta de corte e o cavaco durante a operação de usinagem. Os fluidos de corte são produtos com composições complexas, contendo agentes químicos que variam de acordo com o tipo de operação a ser executada e com os metais a serem trabalhados (RUNGE e DUARTE, 1990; OLIVEIRA, 2006).

Alves (2005) enfatiza também o importante papel dos fluidos de corte não só na lubrificação e resfriamento do processo de usinagem como também lista outras funções importantes como: remoção dos cavacos da região de corte, prevenção contra a soldagem cavaco-ferramenta (formação de arestas postiças), proteção contra corrosão, redução da dilatação térmica da peça, prevenção contra dano estrutura superficial e o crescimento exagerado de tensões residuais na superfície da peça usinada e redução no custo ferramental na operação. A autora relata ainda a grande variedade de fluidos de corte existente no mercado e os quatro grupos principais que são divididos a saber: os óleos integrais, emulsionáveis, semi-sintéticos e sintéticos. Cada tipo de fluido apresenta suas características, vantagens e limitações, sendo a escolha do tipo de fluido mais adequado dependente do tipo de operação a ser realizada.

Os fluidos de corte possuem na composição alguns tipos de aditivos que são destinados à funções específicas. Segundo a Petrobras (1999, apud MUNIZ, 2008) os aditivos são produtos químicos que aumentam a eficiência dos fluidos, reforçando e conferindo-lhes características necessárias às exigências das máquinas modernas.

Muito se tem pesquisado em relação a substituição de aditivos nos fluidos de corte. Isso não se justifica tão somente pela simples necessidade de encontrar aditivos alternativos que possam atender melhor às exigências legais quanto a preservação do meio ambiente (BRAGA, 2001), mas também pela conveniência em se buscar aditivos mais eficientes e de menores custos nos processos de usinagem.

A nanotecnologia tem sido amplamente estudada como umas das formas de se obter melhorias nas propriedades dos fluidos de corte. O uso de nano-aditivos tem se mostrado bastante promissor, pois eles oferecem meios de melhorar o desempenho dos fluidos de corte através da adição de partículas manométricas. E para explicar a melhoria dessas propriedades inúmeros mecanismos foram propostos a saber: efeito de rolamento de esfera, formação de película protetora, efeito de remendagem e efeito de polimento (LEE et al, 2009). Esses mecanismos são classificados em dois grupos principais, como mostrado na Fig. 1.

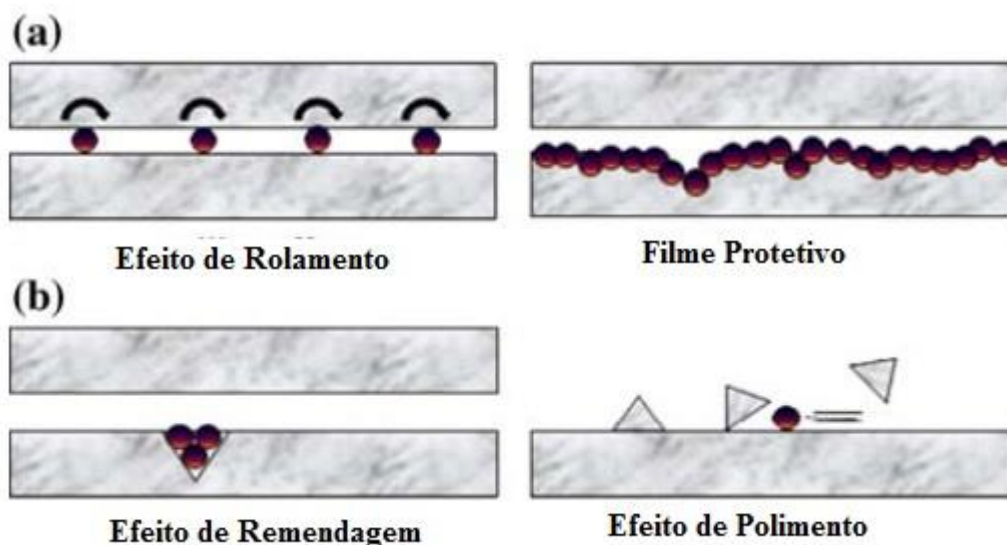


Figura 1 – Mecanismos de lubrificação propostos entre superfícies em contato pelo uso de NP's (LEE et al, 2009, adaptado).

O primeiro mecanismo é o efeito direto das NP's sobre o aperfeiçoamento da lubrificação. As NP's suspensas em óleo lubrificante desempenham o papel de rolamentos de esferas entre as superfícies de atrito. Além disso, eles também formam uma película protetora na extensão do revestimento das superfícies ásperas. O efeito secundário se caracteriza pela presença de NP's no realce superficial. As NP's depositam-se na superfície de atrito e compensam a perda de massa, conhecida como efeito de remendagem. Ainda ocorre uma redução na rugosidade da superfície reduzida por abrasão auxiliada pelas NP's, o chamado, efeito de polimento.

2. USO DE NANOPARTÍCULAS EM FLUIDOS DE CORTE

Setti, Ghosh e Rao (2012) estudaram o uso de nanopartículas (NP's) de óxido de alumínio (Al_2O_3) aditivadas em água nas concentrações de 1% e 4% de NP's no aplainamento da liga de titânio Ti-6Al-4V. Foram usados dois fluidos de corte para efeito comparativo em relação aos nanofluidos de Al_2O_3 , um fluido comercial a base d'água na concentração de 1:40 e água pura. Os nanofluidos foram preparados dispersando-se NP's de Al_2O_3 de tamanho médio de 40 nm em água. Foram utilizadas as frações de 1% e 4% em volume de nanofluidos para os testes.

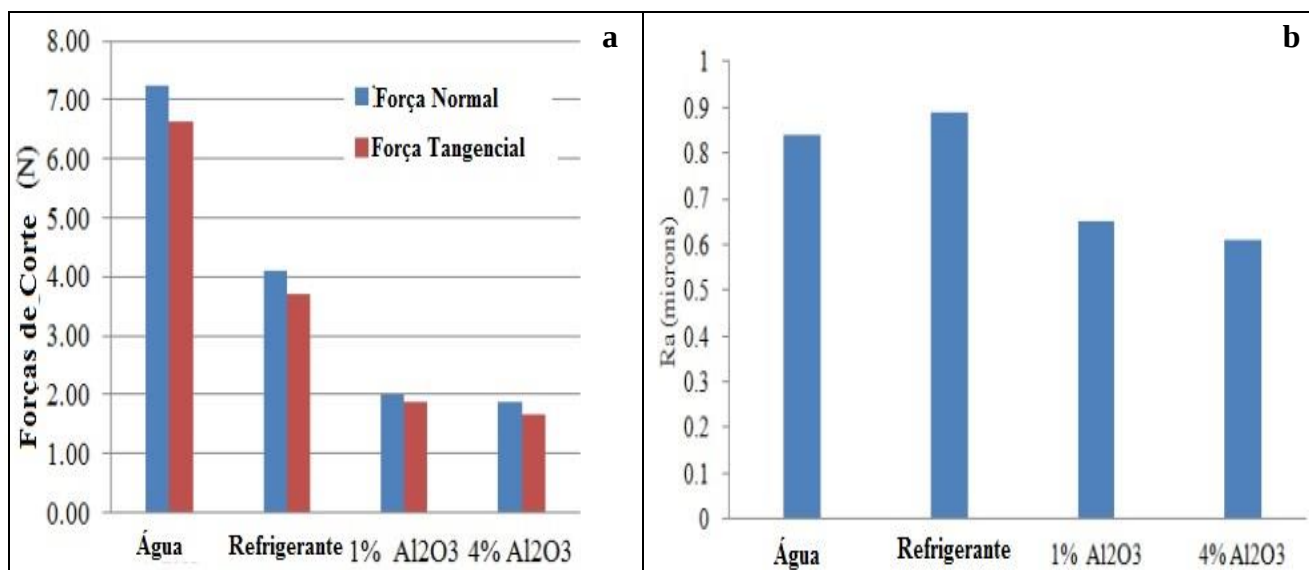


Figura 2 - Comparação dos resultados das forças durante o corte (a) e análise da rugosidade da peça obtida (b) (adaptado de SETTI, GHOSH e RAO, 2012).

Com o uso de um dinamômetro piezoelétrico acoplado a um amplificador as forças de moagem foram medidas. Os resultados experimentais mostraram que as forças envolvidas no processo (força normal e tangencial) reduziram significativamente quando se utilizou o nanofluido de corte. Verificou-se também que o acabamento superficial melhorava a medida em que se aumentava a concentração das NP's enquanto que as forças, normal e tangencial, permaneciam inalteradas com essa variação, como pode ser visto na figura acima. Esses efeitos de lubrificação superiores das NP's podem ser justificados pelo aumento da extrema pressão do tribofilme e pelo efeito de rolamento das nanoesferas durante o processo de aplainamento. Khandekar et al (2012) já havia obtido os mesmos resultados quanto aos benefícios das NP's de Al_2O_3 em fluidos de corte no processo de usinagem. Ele adicionou 1% em volume de NP's de Al_2O_3 autossintetizadas ao fluido de corte do tipo emulsão. Ele comparou o desempenho durante usinagem a seco e usinagem com fluidos convencionais ao desempenho obtido com o nanofluido de Al_2O_3 ao cortar materiais de aço AISI 4340.

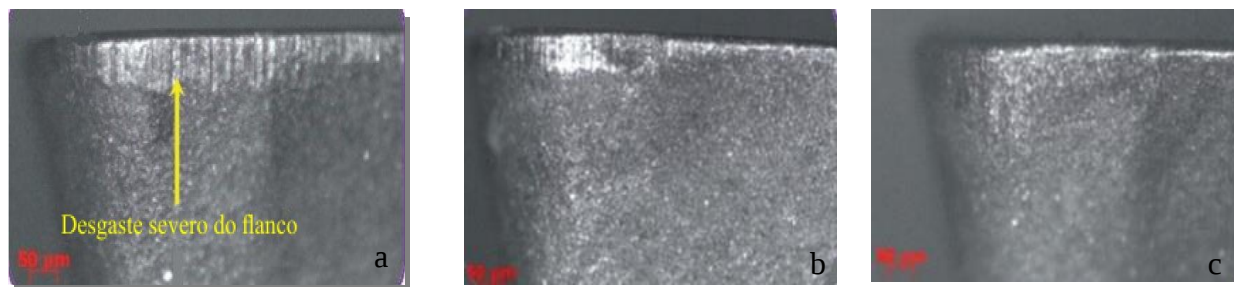


Figura 3 – Ferramenta de corte usada no torneamento (a) seco, (b) com fluido de corte convencional e (c) com nanofluido de Al_2O_3 (KHANDEKAR et al, 2012; adaptado pelo autor).

A fig. 3 mostra claramente o menor desgaste da ferramenta de corte quando utilizado o nanofluido de corte de Al_2O_3 , imagem (c). Já na imagem (b), com uso de fluidos de corte convencionais, observa-se uma grande quantidade de desgaste, assim como na imagem (a), com usinagem a seco.

Prasad et al (2016) observou a influência da adição de MWCNTs (nanotubos de carbono de múltiplas paredes) e de NP's de óxido de zinco (ZnO) em óleo solúvel, nos parâmetros rugosidade de superfície e temperatura de corte ao usinar aço macio IS2062. O autor informa que em seus estudos anteriores havia constatado as excelentes propriedades de transferência de calor do MWCNTs e as notórias propriedades referentes a lubrificação do óxido de zinco.

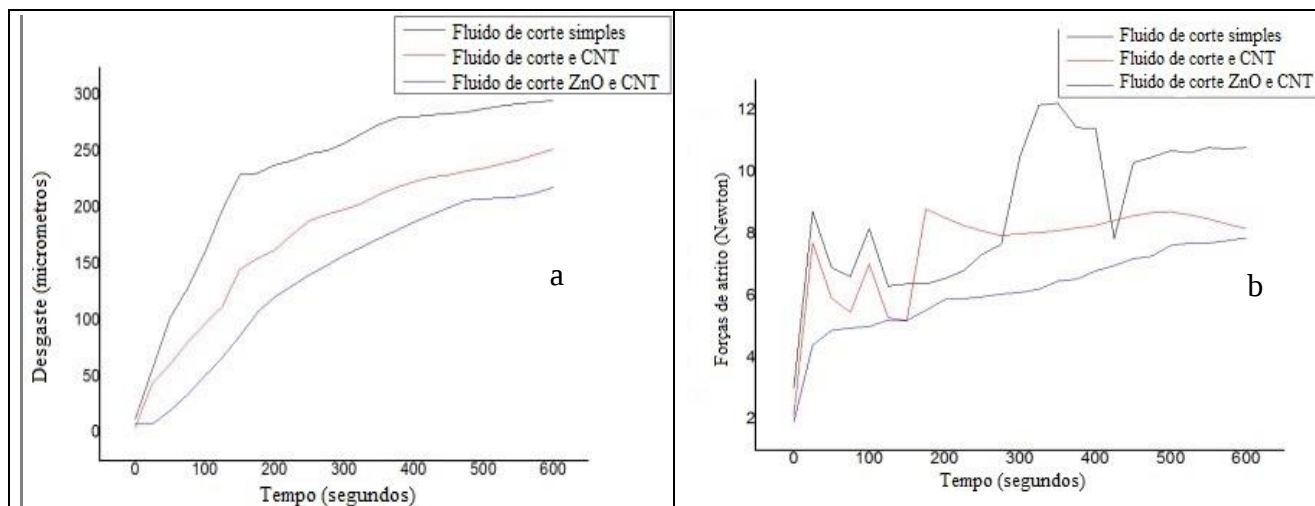


Figura 4 - Variação do desgaste pino/disco pela aplicação de diferentes fluidos de corte (a) e variação do atrito pino/disco pela aplicação de diferentes fluidos de corte (b) (PRASAD et al 2016).

Prasad et al (2016) preparou duas amostras de nanofluidos de corte dispersando 0,01% em volume de MWCNTs e uma mistura de 0,01% em volume de MWCNTs e 0,01% em volume de NP's de ZnO no óleo. Os fluidos obtidos foram comparados e analisados entre si e entre um fluido de corte simples.

Os resultados mostrados na Fig. 4 (a) e (b) indicam que a dispersão das NP's em fluidos melhora as suas propriedades de lubrificação. O nanofluido de corte contendo 0,01% vol de MWCNTs e 0,01% vol de NP's de ZnO produziu menor desgaste e atrito pela análise do tribômetro de pino sobre o disco. O material do pino escolhido foi HSS M 02, semelhante ao material da ferramenta. A análise mostrou uma redução de cerca de 83% em relação ao fluido de corte simples. Já o desgaste e atrito produzidos pelo fluido de corte contendo 0,01% vol de MWCNT situa-se entre o

fluido de corte simples e o fluido de corte contendo MWCNTs e ZnO, o que explica as excelentes propriedades de lubrificação das NP's de ZnO. Esse atributo do ZnO também foi comprovado por Alves et al (2013) e Trajano (2013) ao utilizá-lo como aditivo, redutor de atrito e desgaste, em óleo lubrificante de base mineral. O autor explica ainda que o aumento da resistência dos valores de atrito e desgaste deve-se aos efeitos diretos tais como, rolamento, formação de película, deslizamento e melhoria dos efeitos de superfície, tais como reparação e polimento associado ao uso de NP's.

Bakalova et al (2016) afirma que a utilização de nanoaditivos sob a forma de NP's é altamente eficiente devido à sua elevada atividade química e biológica. Ele explica que as NP's ao serem dispersas em volume nos fluidos de corte, podem penetrar facilmente entre as superfícies em atrito e influenciar fortemente o efeito elastohidrodinâmico da lubrificação.

O autor (Bakalova et al, 2016) usa, em seu experimento, a adição das NP's de dióxido de silício (SiO_2), dióxido de titânio (TiO_2) e prata (Ag) em fluidos de corte com o intuito de reduzir a média do coeficiente de atrito bem como observar a influência nas propriedades antibacterianas. Para a modificação dos fluidos de corte, fornecidos industrialmente, utilizou-se uma solução aquosa a 5% em volume destes, com uma adição de NP's de 1 g/L (TiO_2 ou SiO_2). Ambas as substâncias foram adicionadas aos fluidos de corte na forma de um pó. Foi adicionado nitrato de prata (AgNO_3) ao fluido de corte formando uma solução aquosa a 5% em volume e posterior redução das partículas de prata por radiação UV e ácido ascórbico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$) realizado diretamente na solução dos fluidos de corte. A modificação foi completada por homogeneização da mistura utilizando ultrassom para uma distribuição uniforme de NP's no volume do fluido de corte. O diâmetro das NP's de TiO_2 foi de 40 nm, SiO_2 de 30 nm e Ag de 20 nm. As NP's de TiO_2 apresentaram uma superfície plana com bordas lisas, as NP's de SiO_2 e Ag tiveram uma estrutura irregular áspera com alta porosidade. Realizou-se teste tribológico utilizando uma esfera feita de Si_3N_4 com um diâmetro de 6,350 mm, com uma carga constante de 10 N à temperatura ambiente e humidade de $40 \pm 2\%$. O material do disco foi 16MnCr5, aço com uma superfície polida e uma rugosidade de R_a 0,01 mm. O raio do círculo ao longo do corpo da bola em movimento foi de 12 mm e o coeficiente de atrito foi medido utilizando uma solução a 5% de fluido de corte com um volume de 100 mL.

Em relação a atividade bacteriana, houve uma significativa redução nos tipos de bactérias analisados, mesmo após 120 dias de experimento, quando o fluido de corte foi aditivado com as NP's de SiO_2 , TiO_2 ou Ag. Quanto a redução em volume de desgaste, a adição das NP's de SiO_2 apresentou o valor mais significativo com aproximadamente 52,1% de redução em comparação com fluido de corte sem adição de NP's. Já a adição das NP's de TiO_2 reduziram apenas 34% o volume de desgaste, enquanto que houve um aumento de 9,8% no desgaste quando aditivado com Ag.

As NP's de prata (Ag) também foram analisadas por Saravanakumar et al (2014). Ele utiliza o método de redução química para preparar NP's de prata estáveis partindo do nitrato de prata que foi reduzido por boro-hidreto de sódio na presença de um estabilizador. Em seguida as NP's foram caracterizadas e verificou-se uma forma esférica e um tamanho médio entre 5 e 20 nm. As NP's de prata foram dispersas nos fluidos de corte através do banho de ultrassom. Foram adicionadas NP's de prata (0,5% em volume) ao fluido de corte e posterior agitação. A dispersão foi feita tomando a mistura de fluido de corte num copo de 1 litro colocando-a em banho de ultrassom cheio com água destilada. Os resultados do experimento comprovaram o aumento das propriedades para os fluidos de corte dispersos com NP's de Ag. A análise mostrou que as forças de corte foram reduzidas em 8,8% em comparação ao fluido de corte sem NP's, ver fig. 5 (a). Já a rugosidade superficial da peça de trabalho diminuiu para 7,5% com o uso do nanofluido, ver fig. 5 (b).

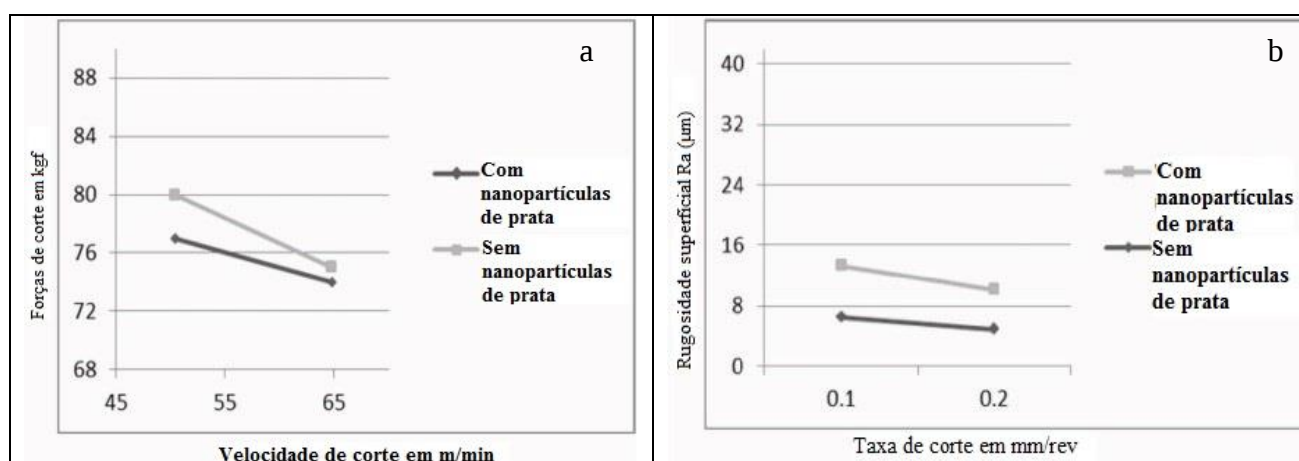


Figura 5 – Forças de corte x velocidade de corte com e sem o uso das NP's de Ag (a) e rugosidade da superfície x taxa de corte com e sem o uso das NP's de Ag (b) (SARAVANAKUMAR et al, 2014).

Os valores de temperatura medidos durante o processo de torneamento para fluido de corte com aditivo de NP's de Ag é observado mínimo, mostrando assim, o aprimoramento na transferência de calor na zona de corte. O material usinado foi o aço macio.

Há um enorme entusiasmo gerado na área de nanoaditivos por parte dos pesquisadores. Isso se justifica pelo simples fato, já comprovado por muitos autores, de que as NP's concedem aos fluidos características especiais. Na tabela 1 encontra-se uma lista das pesquisas mais recentes nesta área.

Tabela 1 – Nanofluidos usados em diferentes processos de usinagem e seus resultados.

OPERAÇÃO	TIPOS DE NP's	RESULTADOS	REF.
Retificação	Al ₂ O ₃	1% a 4% de NP's em base d'água reduziu as forças de usinagem e a rugosidade superficial.	Setti, Ghosh e Rao (2012)
Torneamento	Al ₂ O ₃	1% de NP's em água reduziu a rugosidade superficial em 28,5% e 54,5%, as forças de corte reduziram em 30% e 50%. Reduziu o desgaste da ferramenta e melhorou a molhabilidade.	Khandekar et al (2012)
Fresamento	MWCNT's e ZnO	Nanofluido de corte contendo 0,01% vol de MWCNTs e 0,01% vol de NP's de ZnO reduziu em 83% a rugosidade superficial e atrito comparado à usinagem com fluidos convencionais.	Prasad et al (2016)
Usinagem geral	SiO ₂ , TiO ₂ e Ag	Suprimiu a proliferação bacteriana utilizando NP's de Ag com ácido ascórbico (até 90,4%) e usando NP's de SiO ₂ (até 70,5%). Reduziu coeficiente de atrito médio (até 8,9% com SiO ₂ , 10,7% com TiO ₂) e o volume de desgaste (até 52,1% com SiO ₂ , 34,0% com TiO ₂).	Bakalova et al (2016)
Torneamento	Ag	As forças de corte foram reduzidas em 8,8% em comparação ao fluido de corte sem NP's, a rugosidade superficial da peça diminuiu para 7,5% com o uso do nanofluido com 0,5% em vol. de Ag.	Saravanakumar et al (2014)
Fresamento	SiO ₂	Reduziu potência, força de corte e energia específica.	Sarhan, Sayuti e Hamdi (2012)
Fresamento	Cebolas de carbono	A concentração mais elevada de cebola de carbono (1,5% em peso) produziu menor força de corte e mínima rugosidade superficial.	Sayuti et al (2012)
Fresamento	MoS ₂	0,5% em peso de MoS ₂ produziram uma melhor superfície e uma qualidade de superfície deteriorada com o aumento na concentração de MoS ₂ para 1% em peso.	Rahmati, Sarhan e Sayuti (2014)
Retificação	MoS ₂	Alta concentração de MoS ₂ produziu alta razão G com MQL e baixa razão G com lubrificação por inundação.	Shen et al (2008)
Retificação	Al ₂ O ₃ ND	4% de Al ₂ O ₃ concentrado melhorou a razão G enquanto que a melhor superfície foi produzida sob resfriamento por inundação.	Shen, Shih e Tung (2008)
Retificação	xGnP	Verificou-se que as plaquetas de grande tamanho eram mais eficazes do que as pequenas. 1% em peso de plaquetas de grafite produziram o melhor acabamento superficial.	Alberts, Kalaitzidou e Melkote (2009)
Retificação	MWCNT	A qualidade da superfície melhorou do nível micro ao nível nano.	Prabhu e Vinayagam (2010)
Retificação	CNT	Aumentou o ponto de fulgor e o ponto de inflamação do fluido. Melhorou a rugosidade da superfície.	Prabhu e Vinayagam (2012)
Torneamento	MoS ₂ , GF Cu e CuO	Nanopartícula de cobre (10%) misturada com graxa gerou uma superfície com menor rugosidade e minimizou o desgaste da ferramenta.	Yan, Zhang e Kuriyagawa (2011)
Torneamento	Grafite	0,1 % em peso de nanografite diminuiu a força de corte em até 69%, reduziu a rugosidade superficial, desgaste da ferramenta e temperatura. 0,3% de grafite a 15 mL = fluxo mínimo mostrou melhor desempenho.	Prasad e Srikant (2013)
Torneamento	SiO ₂	0,5% em peso de SiO ₂ com pressão de ar de 2 bar e 60° ângulo de bocal registrou mínimo desgaste da ferramenta e com baixa pressão de ar e ângulo do bocal de 30° produziu a melhor superfície.	Sayuti, Sarhan e Salem (2014)

2.1. DIFICULDADES OBSERVADAS

Embora o uso de NP's como aditivo em lubrificantes e fluidos de cortes seja promissor, ainda existem várias lacunas a serem esclarecidas, tais como: a melhor concentração de partículas a ser usada, o tamanho mais adequado e principalmente, a dispersão no fluido. Este último é um processo delicado que deve ser executado de tal modo, que na sua dispersão, inexistam aglomerados que poderiam ocasionar a perda das propriedades desejadas.

A ocorrência desses aglomerados representa uma das principais dificuldades na preparação dos nanofluidos (Shokooi e Shekarian, 2016). Ela é causada por uma tendência natural que as NP's têm de se agregarem em virtude de sua alta instabilidade química. Quando isso acontece, surgem pequenas colônias de NP's que podem não mais apresentarem medidas nanométricas, fato que poderá provocar um efeito negativo na lubrificação. Sendo assim, se faz necessário o uso de estratégias que envolvem o revestimento com espécies orgânicas, incluindo surfactantes ou polímeros, ou revestimento com uma camada inorgânica a fim de estabilizar quimicamente as NP's (LU et al 2007). Essa estabilização se dá pela formação de uma película protetora que envolve cada NP e evita que elas se aglomerem, garantindo com isso uma boa dispersão em óleo.

Mello et al (2016) e Alves et al (2016) conseguiram minimizar esse efeito nas NP's de óxido de cobre ao utilizar ácido oleico como estabilizador químico, chegando a excelentes resultados. Wu et al (2016) também obteve resultado satisfatório ao modificar a superfície das NP's de ZnO pelo encapsulamento através do ácido oleico, inibindo assim a aglomeração e mantendo uma distribuição de tamanho relativamente estreita entre as NP's.

Quanto à concentração e ao tamanho referentes às NP's, ambas têm funções semelhantes. Tanto uma concentração maior que a necessária, quanto tamanhos de NP's grandes podem produzir partículas excessivamente duras com a formação de óxidos, os quais irão ocasionar um maior desgaste. Rahmati, Sarhan e Sayuti (2014), observaram que ao aumentarem a concentração de NP's de dissulfeto de molibdênio de 0,5% para 1% em peso, no processo de fresamento, obtiveram uma qualidade de superfície inferior, concluindo dessa forma, que as menores concentrações originam melhores resultados. Eles utilizaram NP's de tamanhos entre 2 e 60 nm e perceberam ainda que partículas menores são mais eficazes na formação do filme protetor. Esses estudos fornecem evidências necessárias de quais caminhos devem ser seguidos, pois eles demonstram que a concentração, o tamanho e a forma de dispersão no fluido pelas NP's têm grande influência no desgaste em processos de usinagem.

3. CONCLUSÃO

Esta revisão mostra que não somente a adição de NP's em fluidos de corte são responsáveis pelo melhoramento dos parâmetros em processos de usinagem, como também, vários fatores que devem ser considerados, tais como: tipo de NP usada, a adesão à superfície, o tamanho, a forma geométrica e a concentração das mesmas nos fluidos de base também são aspectos que devem ser levados em conta.

De acordo com esse artigo, a utilização de NP's em fluidos de corte, proporcionam um melhoramento nos processos de usinagem. Fatores como: melhor dissipação do calor no processo, menor desgaste da ferramenta, melhor qualidade da superfície da peça trabalhada e menores forças de corte podem ser potencializados com o uso das NP's.

Embora se tenha estudado sobre o uso de NP's e suas características nas últimas décadas, a compreensão a respeito de seu comportamento se mostra ainda bem distante.

Este artigo apresentou inúmeras estudos que mostram vantagens quanto ao uso das NP's como aditivos alternativos em fluidos de corte, porém existem grandes desafios que podem ser tópicos de investigações futuras quanto ao uso das mesmas. Talvez o mais importante deles seja o desafio de preparar e manter uma solução homogênea das NP's nos fluidos, a fim de se ter uma boa dispersão. As NP's têm uma tendência natural de agregarem entre si, tornando a obtenção de soluções estáveis física e quimicamente, um processo complicado.

Outro ponto importante relativo às aplicações de NP's é o seu elevado custo de produção que está associado à necessidade de se utilizar dispositivos de alta tecnologia, portanto caros, para a sua produção.

Em vista disso, a atenção deve ser voltada à melhoria das técnicas de produção de NP's, tendo como objetivo, viabilizar economicamente suas aplicações.

4. REFERÊNCIAS

- Alves, S.M., Barros, B.S. e Trajano, M.F. et al. "Tribological behavior of vegetable oil-based lubricants with nanoparticles of oxides in boundary lubrication conditions" - Tribology International 65 (2013), pp. 28–36.
- Alves, S.M., Mello, V.S., Faria, E.A. et al. "Nanolubricants developed from tiny CuO nanoparticles" Tribology International 100 (2016), pp. 263–271.
- Alberts, M., Kalaitzidou, K. e Melkote, S. "An investigation of graphite nanoplatelets as lubricant in grinding" International Journal of Machine Tools & Manufacture 49 (2009), pp. 966–970.
- Bakalova, T., Svobodova, L., Rosicka, P. et al. "The application potential of SiO₂, TiO₂ or Ag nanoparticles as fillers in machining process fluids" - Journal of Cleaner Production 142 (2017) pp. 2237 - 2243.

- Giri Prasad, M. J., Abhishek Raaj, A S. e Kumar, R R. "Optimization of Machining Parameters of Milling Operation by Application of Semi-synthetic oil based Nano cutting Fluids" *Materials Science and Engineering* 149 (2016).
- Yan, J., Zhang, Z. e Kuriyagawa, T. "Effect of Nanoparticle Lubrication in Diamond Turning of Reaction-Bonded SiC" *Int. J. of Automation Technology*, Vol.5, No.3, 2011, pp. 307-312.
- Khandekar, S., Sankar, M. R. e Agnihotri, V. et al. "Nano-Cutting Fluid for Enhancement of Metal Cutting Performance" *Materials and Manufacturing Processes*, 27, 2012, pp. 1-5.
- Lee, K., Hwang, Y., Cheong, S. et al., 2009 "Understanding the Role of Nanoparticles in Nano-oil Lubrication" Springer Science+Business Media, LLC.
- Lu, A., Salabas, E. L. e Schuth, F. "Magnetic Nanoparticles: Synthesis, Protection, Functionalization, and Application" *Angew. Chem. Int. Ed.* 2007, 46, pp. 1222 – 1244.
- Mello, V. S., Guedes, A. E. D. S., Alves, S. M. et al. "Leverage about synthesis and dispersion with cuo nanoparticle in oil lubricating" *ITEGAM - JETIA* Vol. 02, No. 05., 2016. Manaus/Amazonas, Brasil, pp. 53-60.
- Mamidi, V.K. e Xavier, M. A., 2012 "A Review on Selection of Cutting Fluids", *National Monthly Refereed Journal Of Reasearch In Science & Technology*, Vol. 1, ISSUE n. 5, Munbai/Índia, pp. 1-19.
- Oliveira, J. F. G; Alves, M. S. "Novos Fluidos de Corte Adequados ao Desempenho Mecânico da Retificadora e ao Meio Ambiente" III Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF), Joinville /SC, (2005).
- Prabhu, S e Vinayagam, B. K. "AFM investigation in grinding process with nanofluids using Taguchi analysis" - *Int J Adv Manuf Technol* (2012) 60, pp. 149-160.
- Prasad, M. M. S. e Srikant, R. R. "Performance evaluation of nano graphite inclusions in cutting fluids with mql technique in turning of aisi 1040 steel" *International Journal of Research in Engineering and Technology* – Vol. 02, Issue: 11, (2013), pp. 381-393.
- Prabhu, S. e Vinayagam, B. K. "Nano surface generation of grinding process using carbono nano tubes" *Indian Academy of Sciences, Sadhan*, Vol. 35, Part. 6, (2010), pp. 747-760.
- Setti, D., Ghosh, S. e Rao, P. V. "Application of Nano Cutting Fluid under Minimum Quantity Lubrication (MQL) Technique to Improve Grinding of Ti – 6Al – 4V Alloy" *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering* Vol:6, No:10, 2012.
- Saravanakumar, N., Prabu, L., Karthik, M. et al. "Experimental analysis on cutting fluid dispersed with silver nano particles" - *Journal of Mechanical Science and Technology* 28 (2) (2014) pp. 645-651.
- Shokoohi, Y. e Shekarian, E. "Application of Nanofluids in Machining Processes - A Review" - *Journal of Nanoscience and Technology* 2(1) (2016), pp. 59-63.
- Sayuti, M., Sarhan, A. A.D. e Salem, F. "Novel uses of SiO₂ nano-lubrication system in hard turning process of hardened steel AISI4140 for less tool wear, surface roughness and oil consumption" *Journal of Cleaner Production* 67 (2014), pp. 265-276.
- Sarhan, A. A. D., Sayuti, M. e Hamdi, M. "Reduction of power and lubricant oil consumption in milling process using a new SiO₂ nanolubrication system" - *Int J Adv Manuf Technol* (2012) 63, pp. 505-512.
- Sayuti, M., Sarhan, A. A. D., Tanaka, T. et al. "Cutting force reduction and surface quality improvement in machining of aerospace duralumin AL-2017-T4 using carbon onion nanolubrication system" *Int J Adv Manuf Technol* (2013) 65, pp. 1493-1500.
- Shen, B, Malshe, A. P., Kalita, P. et al. "Performance of Novel Mos₂ Nanoparticles Based Grinding Fluids in Minimum Quantity Lubrication Grinding" *Transactions of NAMRI/SME*, Volume 36, 2008, pp. 357-364.
- Shen, B., Shih, A. J. e Tung, S. C. "Application of Nanofluids in Minimum Quantity Lubrication Grinding" *Tribology Transactions*, 51: 730-737, 2008.
- Runge, P. R. F. e Duarte, G. N. "Lubrificantes nas Indústrias - Fluidos de Corte" Cotia: Triboncept, 1990. cap.4, pp. 71-172.
- Rahmati, B., Sarhan, A. A. D. e Sayuti, M. "Morphology of surface generated by end milling AL6061-T6 using molybdenum disulfide (MoS₂) nanolubrication in end milling machining" *Journal of Cleaner Production* 66 (2014), pp. 685-691.
- Trajano, M. F. "Estudo tribológico de biolubrificantes com adição de nanopartículas de óxidos (zinco e cobre)" *Dissertação*. Natal/RN, agosto/2013.
- Wu, L., Zhang, Y., Yang, G., et al. "Tribological properties of oleic acid-modified zinc oxide nanoparticles as the lubricant additive in poly-alpha olefin and diisooctyl sebacate base oils" - *RSC Adv.*, 2016, 6, pp. 69836-69844.

APPLICATION OF NANOLUBRICANTS IN MACHINING - A REVIEW

Wender Teixeira de Almeida, wendermv@gmail.com¹

Valdicleide Silva e Mello, valdkqi@hotmail.com¹

Salete Martins Alves, saletealves@ect.ufrn.br¹

Adilson José de Oliveira, adilson@ct.ufrn.br¹

¹ Department of Mechanical Engineering, Center of Technology, Federal University of Rio Grande do Norte, Av. Senador Salgado Filho, 3000, Lagoa Nova, Zip code 59078-970, Natal/RN – Brazil

Abstract. One of the methods most widely used in the production segment in the industry is machining. In this process the cutting fluids represent a major role in influencing parameters satisfactory performance in the manufacturing process. Studies on cutting fluids area have intensified especially in the called nanofluids because they demonstrate great potential in heat transfer cause they have higher thermal and tribological properties compared to conventional fluids. This research aims to review the most influential parameters of the characteristics of nanoparticles that are used in cutting fluids, as well as the beneficial effects of nanofluids in machining processes. A more detailed analysis of the review in machining operations with nanofluids with higher concentrations of particles can observe an improvement in characteristics such as surface finish and surface enhancement effect (mending and polishing) when compared to machining with conventional cutting fluid. Other factors such as the reduction in coefficient of friction, less tool wear, reduced cutting forces and lower power consumption in the process, are also observed. Thus, the study sheds light on the future prospects in the context of using nanofluids in machining processes, as well as the gaps that will provide future research.

Keywords: machining, nanofluids, nanoparticles.