

MELHORIA DO PROCESSO DE USINAGEM POR HIDROEROSÃO BASEADO NA CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO FLUIDO ABRASIVO

Marina Izabelle Grabarski, marina.grabarski@ifpr.edu.br¹
Diandra Grossmann Pereira, diandragrossmann@gmail.com²
Giuseppe Pintaúde, pintaude@utfpr.edu.br²

¹IF-PR, Campus Paranaguá, Paranaguá, Brasil.

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Departamento Acadêmico de Mecânica, Curitiba, Brasil.

Resumo: A usinagem por hidroerosão é um processo chave para a produção de bicos injetores Diesel. Sua eficiência no arredondamento de furos depende das propriedades físicas do fluido abrasivo. Este manuscrito revisa algumas tentativas de manter constantes as características do fluido abrasivo ao longo do tempo de produção. Resultados prévios mostraram que a reposição de um óleo mineral de alta viscosidade junto com partículas relativamente grandes poderia ser uma solução adequada para tanto, mas algumas dificuldades foram verificadas e são apresentadas aqui. Perspectivas de pesquisa para este tipo de processo são descritas, significando a introdução de novas técnicas de caracterização.

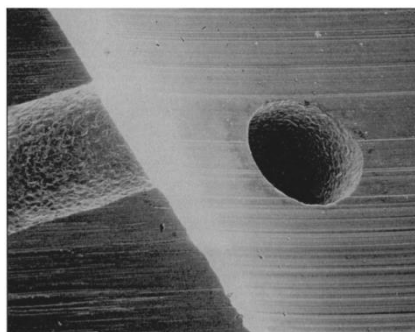
Palavras-chave: Usinagem por hidroerosão, eficiência de processo, viscosidade, distribuição de tamanho de partículas

1. INTRODUÇÃO

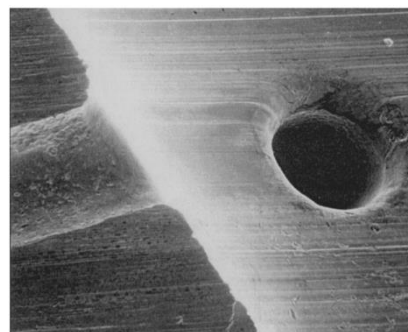
A hidroerosão é um processo de usinagem com ferramenta de geometria não definida, onde um fluido abrasivo é forçado a passar por regiões confinadas e de fluxo restrito. A passagem deste fluido implicará em desgaste dessas regiões, podendo mudar sua geometria e rugosidade. O fluido é composto por uma fase líquida contínua com uma fase sólida dispersa (Weickert, 2011). Industrialmente esse processo é empregado para a rebarbação e polimento de peças de geometria complexa, em geral em regiões internas, onde o acesso de uma ferramenta não é viável. Na indústria automotiva a usinagem por hidroerosão é utilizada para dar acabamento aos canais internos de bicos injetores de combustível, por exemplo.

Em 2011 uma parceria foi proposta entre a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Curitiba, e a empresa Robert Bosch Ltda, também localizada em Curitiba, com o objetivo de identificar possíveis melhorias no processo de hidroerosão existente na planta. Essa divisão da empresa dedica-se a fabricação de sistemas a diesel como bombas injetoras, bicos injetores de combustível e outras peças para sistemas *Common Rail* de injeção.

O processo estudado é empregado para o arredondamento da região de entrada dos canais de bicos injetores, como ilustrado na Figura 1. Cada bico injetor possui de 5 a 7 canais de injeção, cada um com diâmetro entre 100 e 200 μm . O arredondamento da entrada do canal de injeção evita que o diesel cavite nessa região, o que pode gerar redução no nível de emissão de poluentes, menor dispersão dos valores de vazão e redução do desgaste prematuro do componente (Diver, 2006).



(a)



(b)

Figura 1. Canal de um bico injetor antes da usinagem por hidroerosão (a) e após a usinagem por hidroerosão (b), (Freitag, 2011).

Para a usinagem é utilizada uma mistura de óleo mineral e partículas abrasivas de carbeto de boro (B_4C), com tamanho médio de aproximadamente $5 \mu m$. Este abrasivo possui alto custo de fabricação, que se justifica em parte com sua maior eficiência quando comparado a outros abrasivos (Gov e Eyercioglu, 2016). Para cada bico a ser usinado há uma concentração adequada de abrasivo, que em geral, varia entre 10 a 15%. A essa mistura pode-se dar o nome de fluido abrasivo ou erosivo. O processo de hidroerosão empregado para os bicos injetores fabricados nessa planta pode ser dividido em quatro fases:

1. Verificação do fluxo hidráulico do bico injetor com óleo de exame.
 - 1.1. Sucção do óleo de exame retido no bico injetor.
2. Hidroerosão dos canais com fluido erosivo
3. Lavagem do bico injetor com óleo de baixa viscosidade.
4. Verificação final do fluxo hidráulico, caso o fluxo desejado não tenha sido atingido o bico deve ser retrabalhado.

Este trabalho está organizado de modo a apresentar o histórico das investigações sobre o processo de usinagem por hidroerosão, sendo os itens 2 e 3 uma revisão bibliográfica dos trabalhos publicados pelo GrMaTS-UTFPR (Grupo de Materiais, Tribologia e Superfícies). O item 4 por sua vez mostra a metodologia e resultados obtidos na tentativa de corrigir o processo por meio da viscosidade. O trabalho finaliza com um item de perspectivas e conclusões.

2. PRIMEIRA ETAPA DE INVESTIGAÇÃO: DIAGNÓSTICO DA PERDA DE EFICIÊNCIA

Notou-se que com o passar do tempo, o fluido erosivo perdia sua eficiência de remoção de material, fazendo com que o tempo de usinagem fosse aumentado. Com o objetivo de entender porque isso ocorria, foi desenvolvido o primeiro trabalho sobre esse processo, por Coseglio (2013), durante sua dissertação de mestrado¹, com a abordagem de caracterização dos componentes do fluido abrasivo ao longo do processo. As características do fluido abrasivo – viscosidade, densidade e concentração – e as do processo – eficiência e grau de acoplamento das partículas com o fluido – foram acompanhadas sem que houvesse alteração de parâmetros. Como não há uma equação padronizada para medir a eficiência desse processo, Wendt et al. (2013) propuseram uma relação entre a variação do fluxo volumétrico que passa no bico injetor antes e depois da usinagem e o tempo total de usinagem, demonstrada na Equação (1). Portanto a eficiência nesse caso não possui um valor percentual, ela será a variação do fluxo volumétrico por segundo, e para cada tipo de bico injetor haverá um valor típico desse indicador. Para um determinado intervalo de tempo é possível normalizar os valores da eficiência, de forma a observar apenas como esses variam com os parâmetros do fluido abrasivo. A eficiência de usinagem também pode ser chamada de taxa de arredondamento.

$$\frac{dE_{h(i)}}{dt} = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} \left(\frac{Q_{2(j)} - Q_{1(j)}}{Q_{1(j)}} \cdot \frac{100}{t_{r(j)}} \right) \quad (1)$$

Onde:

dE_h/dt – Taxa de arredondamento ou eficiência

N_i – Número total de bicos produzidos no lote

Q_1 – Fluxo volumétrico antes da usinagem

Q_2 – Fluxo volumétrico após a usinagem

t_r – Tempo de usinagem

Os resultados do monitoramento são apresentados na Figura 2 (Coseglio et al., 2016). O tempo acumulado de processo foi de 100h, os parâmetros foram comparados entre a amostra FE1 com 50h de usinagem e a FE5 com 150h de usinagem. A eficiência para um determinado bico usinado reduziu de 0,95 pra 0,78 nesse intervalo. Quanto ao fluido abrasivo a densidade não sofreu alterações significativas ao longo do tempo, já a viscosidade e a concentração de partículas caíram. A viscosidade passou de 63,4 mPa.s para 24,9 mPa.s, uma queda de aproximadamente 60%, e a concentração de partículas passou de 18% para 13%. A amostra FE4 representa uma condição intermediária, com 70h acumuladas de usinagem. A concentração volumétrica de partículas nesse ponto foi de 15%, a viscosidade 56,31 mPa.s e a eficiência de 1,0.

¹ Apoiado por meio do convênio ACT 02/2013 “Estudo da Alteração de Geometria do Meio Abrasivo no Processo de Hidroerosão”.

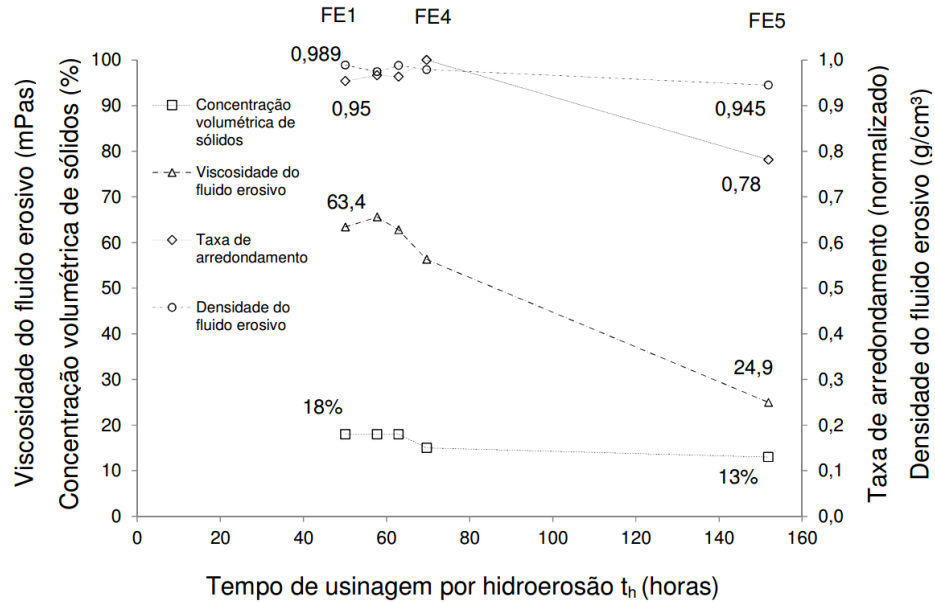
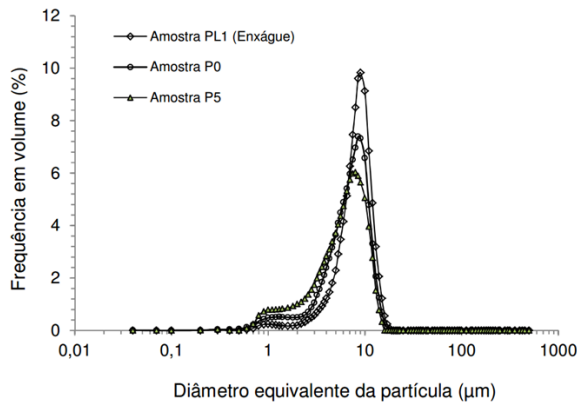
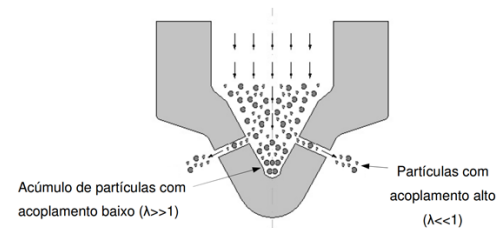


Figura 2. Variação da viscosidade, densidade, concentração do fluido abrasivo e da eficiência do processo, Coseglio et al. (2016).

Outro indício da deterioração do fluido abrasivo com o tempo é a mudança na distribuição de tamanho das partículas, observada na Figura 3 (a). A amostra P0 corresponde ao início do período estudado, a amostra P5 ao final das 150h de usinagem e a amostra PL1 foi retirada do tanque onde é descartado o óleo utilizado para a lavagem dos bicos injetores, após a usinagem. Nota-se que com o passar do tempo de usinagem as partículas grandes tornam-se menos frequentes no fluido, porém são encontradas em maior quantidade no tanque de lavagem. Isso acontece porque as partículas maiores apresentam menor grau de acoplamento (λ) ao fluido, não acompanhando as linhas de fluxo, acabam se perdendo e ficando acumuladas no fundo do bico injetor, como mostra a Figura 3 (b).



(a)



(b)

Figura 3. Variação da distribuição de tamanho de partículas do fluido abrasivo ao longo do processo (a) e mecanismo de perda de partículas com baixo grau de acoplamento ao fluido (b), Coseglio et al. (2016).

Destaca-se ainda que nesta fase do estudo o óleo mineral foi caracterizado em espectroscopia no infravermelho para verificar se o mesmo sofria oxidação com o passar do tempo, sendo que nenhuma evidência foi encontrada nesse sentido (Wendt et al., 2013).

3. SEGUNDA ETAPA DE INVESTIGAÇÃO: AJUSTE DA VISCOSIDADE DO FLUIDO ABRASIVO

A perda de eficiência do processo foi atribuída às mudanças ocorridas no fluido abrasivo. Como sequencia do estudo decidiu-se manter a viscosidade do fluido abrasivo dentro de uma determinada faixa, dessa forma o acoplamento entre as partículas e o fluido seria mantido e consequentemente haveria menor perda de partículas e a eficiência seria mantida. Esse estudo foi implementado também durante uma dissertação de mestrado, desenvolvido por Moreira (2015), abordando agora interferência no processo, além da simples caracterização. Para manutenção do fluido abrasivo um óleo mineral de igual composição química ao já utilizado, porém com maior viscosidade, foi escolhido para ser adicionado de maneira sistemática a fim de corrigir a viscosidade do fluido. O volume de óleo a ser adicionado para que a viscosidade volte ao valor desejado é calculado através da Equação (2), fornecida pelo fabricante do óleo. Caso o volume final do tanque seja maior que sua capacidade uma quantidade de fluido abrasivo deverá ser retirada.

$$V_{\text{correção}} = \frac{(V_f * \log \mu_f - V_i * \log \mu_i) - ((V_f - V_i) * \log \mu_A)}{(\log \mu_B - \log \mu_A)} \quad (2)$$

Onde:

$V_{\text{correção}}$ – Volume de óleo de correção a ser adicionado no tanque

V_f – Volume final do tanque após a correção

V_i – Volume inicial do tanque

μ_f – Viscosidade objetivada

μ_i – Viscosidade do fluido erosivo antes da correção

μ_A – Viscosidade nominal do óleo de processo

μ_B – Viscosidade nominal do óleo de correção

Quando a correção da viscosidade é realizada, uma quantidade de óleo é adicionada ao fluido abrasivo que está circulando na máquina, causando sua diluição. Por isso, além da correção da viscosidade também é necessário corrigir a concentração de partículas abrasivas, para isso o mesmo abrasivo utilizado no início do processo é adicionado juntamente com o óleo, para que a concentração de partículas seja mantida.

Como resultado é possível notar na Figura 34 (a) que a viscosidade do fluido abrasivo ficou dentro de uma faixa pré-estabelecida, e que as correções foram eficientes para corrigir o valor da viscosidade (Moreira et al., 2015). Os valores da viscosidade ficaram entre 55 e 40 mPas. A eficiência, ilustrada na Figura 4 (b), foi acompanhada para o mesmo bico injetor estudado na fase anterior, a variação da eficiência também foi menor ao longo do período de usinagem.

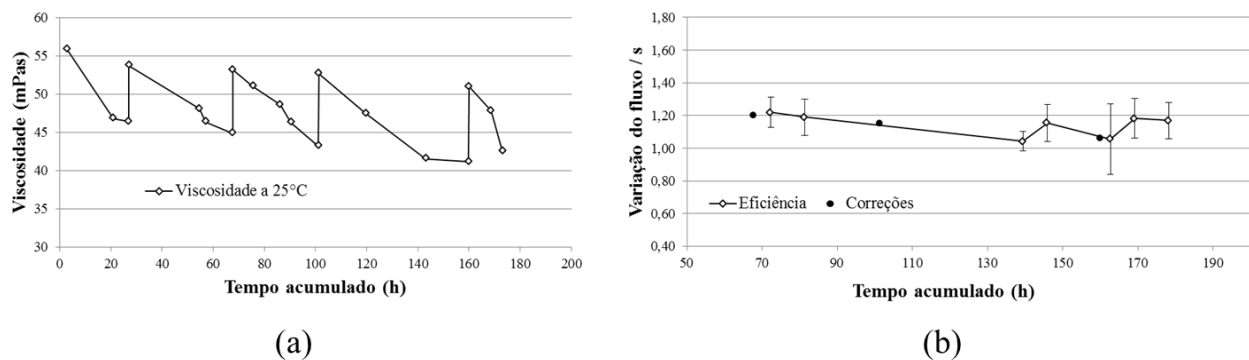


Figura 4. Resultado das correções de viscosidade do fluido abrasivo. Variação da viscosidade (a) e da eficiência (b) com o tempo (Moreira et al., 2015).

A concentração sofreu variações ao longo do processo, ilustrada na Figura 3 (a), acredita-se que essa variação tenha sido proposital para a usinagem de outros bicos que exigem uma maior concentração de abrasivo. As alterações foram feitas pelos próprios operadores da linha. Outra diferença observada na Figura 3 (b) foi a distribuição granulométrica de partículas, que se manteve constante durante todo o processo. Com a manutenção dos parâmetros do fluido abrasivo foi possível obter uma baixa variação da eficiência.

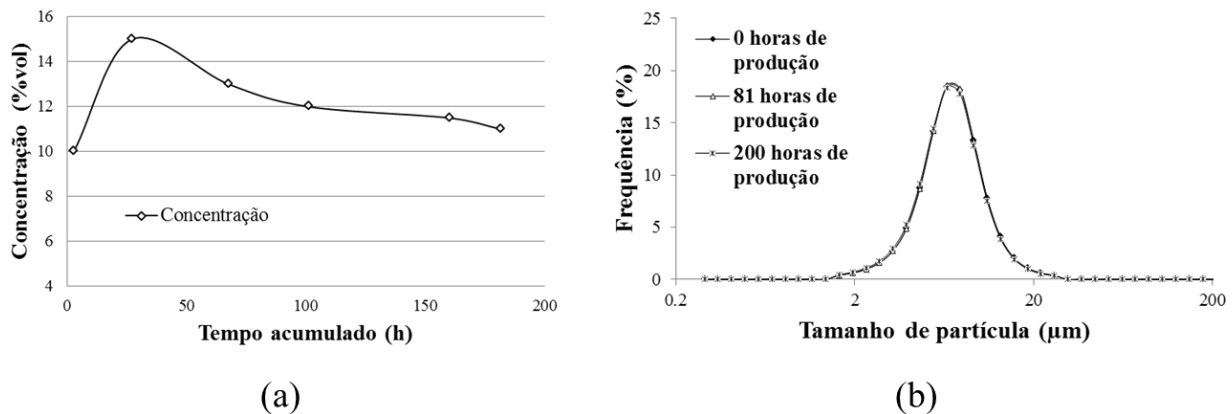


Figura 5. Variação da concentração de partículas abrasivas (a) e da distribuição granulométrica (b) ao longo do tempo de produção, Moreira et al. (2015).

Como alternativa ao método de correção anterior propôs-se o uso de um abrasivo modificado, apenas com partículas maiores. Dessa forma haveria reposição apenas das partículas que eram perdidas ao longo do período de usinagem. Os resultados desse estudo serão apresentados e discutidos a seguir.

4. TERCEIRA ETAPA DA INVESTIGAÇÃO: AJUSTE DA VISCOSIDADE E DO PARTICULADO SIMULTANEAMENTE

4.1. MATERIAIS E MÉTODOS

As correções sistemáticas da viscosidade do fluido abrasivo foram feitas da mesma forma que na fase anterior, o método é ilustrado no fluxograma da Figura 6. A viscosidade nominal do óleo de hidroerosão é 27,9 mPa.s, a viscosidade do óleo de correção 59,2 mPa.s a 40°C, ambos fabricados pela empresa Zeller+Gmelin GmbH & Co. As correções aconteciam dentro de um intervalo de 3 a 5 dias, dependendo do fluxo de produção. A queda de viscosidade entre as correções foi de aproximadamente 10 mPa.s. Em todos os dias onde havia produção, em geral de segunda a sexta-feira, cerca de 400 ml do fluido abrasivo eram coletadas, retiradas diretamente do tanque de alimentação da máquina. Todas as amostras passavam pelo processo de filtragem por sucção para separar o abrasivo do óleo e permitir a realização dos ensaios de viscosidade e granulometria. Conhecendo o valor da viscosidade é possível calcular a quantidade de óleo de correção a ser adicionada. As medições de viscosidade foram realizadas no CERNN – Centro de Pesquisas em Fluidos Não Newtonianos da UTFPR, em um viscosímetro rotativo de cilindros coaxiais da Brookfield modelo DV-II+Pro. A temperatura de medição foi 25°C, a mesma que o fluido abrasivo encontra-se no tanque de processo.

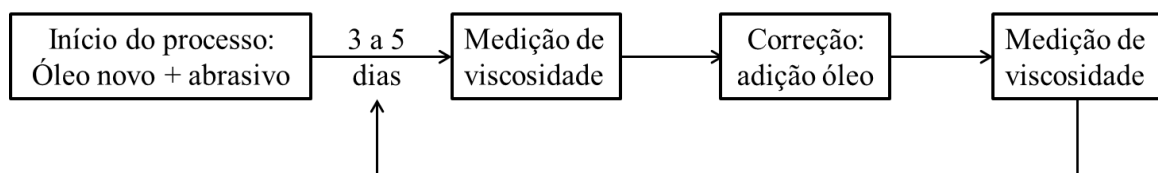


Figura 6. Correções sistemáticas da viscosidade do fluido abrasivo.

A correção da concentração de abrasivo foi realizada junto com a correção de viscosidade. Uma quantidade de abrasivo era adicionada junto com o óleo a fim de manter a concentração constante, já que em consequência da adição de óleo de correção a concentração cairia. O abrasivo utilizado nas correções possuía distribuição granulométrica diferente do abrasivo convencional, ilustrada na Figura 7. O abrasivo modificado possui um maior número de partículas de diâmetro maior sem modificação na composição química. A faixa de tamanho de partícula não é diferente para os abrasivos, apenas a quantidade para cada tamanho é modificada. O abrasivo modificado possui custo de fabricação maior que o convencional, dado que ele passa por um processo de peneiramento para que as partículas menores sejam eliminadas. As análises granulométricas foram realizadas no LASC - Laboratório de Superfícies e Contato da UTFPR, com um granulômetro a laser da marca Microtrac, modelo S3500, com limites de detecção entre 0,02 μm e 2800 μm. Os dados sobre o processo como tempo e fluxo volumétrico antes e depois da usinagem foram coletados para que a eficiência do processo pudesse ser calculada.

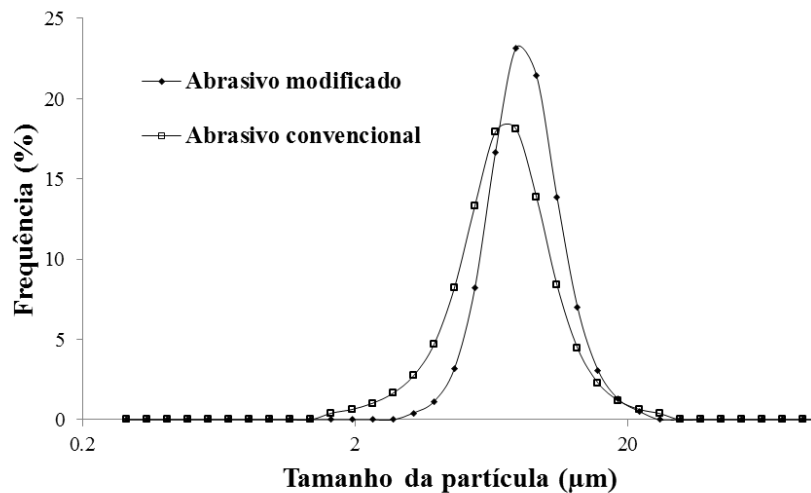


Figura 7. Distribuição granulométrica do abrasivo convencional e do abrasivo modificado.

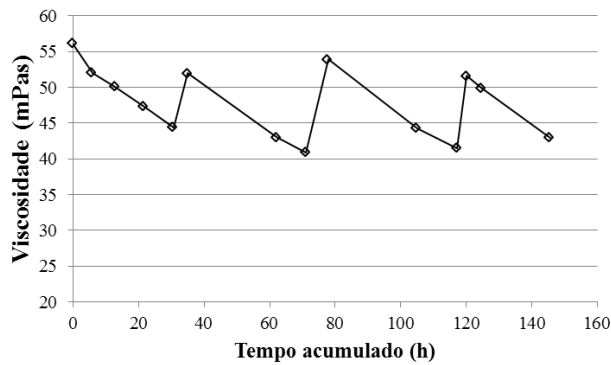
O grau de acoplamento das partículas ao fluido foi calculado. Esse parâmetro também foi reportado nas etapas anteriores, indicando qual é resposta da partícula quando há mudança na velocidade e trajetória do fluido. O grau de acoplamento, ou momento de equilíbrio (λ) é um parâmetro adimensional e pode ser calculado através da equação (3) (Humphrey, 1990). Quando $\lambda < 0,5$ o acoplamento é alto, $0,5 \leq \lambda \leq 1$ o acoplamento é considerado intermediário e para $\lambda > 1$ o acoplamento é baixo. Como já ilustrado na Figura 3 (b) as partículas que apresentam baixo grau de acoplamento não seguirão as linhas de fluxo do fluido e acabarão se perdendo durante o processo de usinagem, o que gera redução na concentração de partículas do meio abrasivo.

$$\lambda = \frac{\tau_p \cdot f_D}{\tau_f} \quad (3)$$

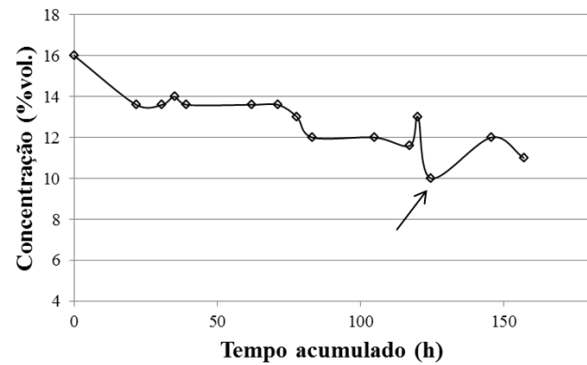
Onde τ_p é o tempo de relaxação da partícula, ou tempo de resposta e τ_f o tempo característico do escoamento. Já $f_D = Re_p D_c / 24$, onde D_c é o coeficiente de arrasto e Re_p o número de Reynolds da partícula. O valor do grau de acoplamento irá variar com parâmetros como tamanho e densidade da partícula, velocidade de escoamento e viscosidade do fluido, e será diretamente proporcional ao tamanho da partícula e inversamente proporcional a viscosidade do fluido.

4.2. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O estudo proposto durou aproximadamente um mês, sem que houvesse troca do fluido abrasivo, apenas realizando as correções de viscosidade e concentração de partículas abrasivas. Caso não houvesse correção da viscosidade, em um período normal de produção, o fluido abrasivo seria utilizado aproximadamente apenas por 15 dias, depois disso a eficiência de processo já estaria muito reduzida. A variação da viscosidade e da concentração são apresentadas nas Figura 8 (a) e (b), respectivamente. Assim como na fase anterior a viscosidade foi mantida entre 40 e 55 mPas, ao todo 3 correções foram efetuadas utilizando a Equação (2) para calcular a quantidade de óleo a ser adicionada. A concentração sofreu variações ao longo do período, durante as correções procurou-se corrigir a concentração para o valor de 13%. O ponto indicado por uma seta, na Figura 8 (b) foi uma alteração realizada pelos operadores após uma correção. Segundo relatado, o fluido abrasivo estava com uma capacidade de remoção muito alta, causando remoção de material em excesso, ultrapassando o fluxo hidráulico especificado para o lote que estava sendo usinado. Para redução da concentração de partículas mais óleo novo de processo é adicionado, assim não há alteração de viscosidade. As alterações seguintes também foram efetuadas pelos operadores conforme a necessidade para a produção.



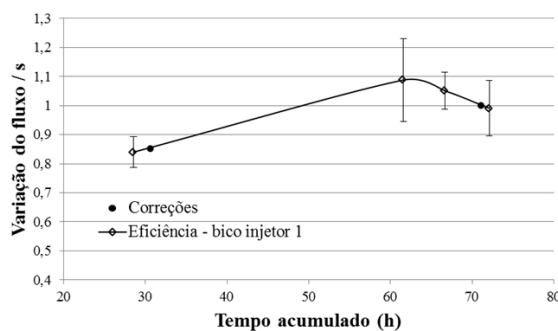
(a)



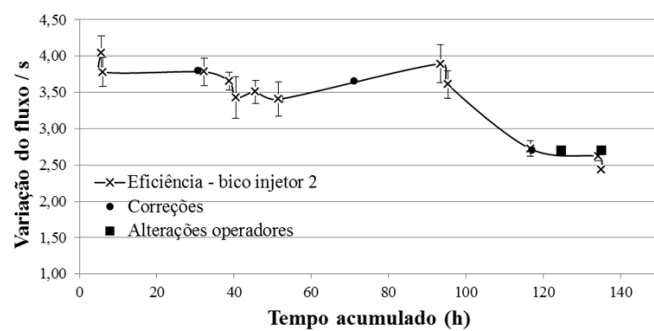
(b)

Figura 8. Variação da viscosidade (a) e da concentração de partículas abrasivas (b) ao longo do período de produção.

A eficiência foi medida para o mesmo bico estudado nas fases anteriores, apresentada na Figura 9 (a), componente esse denominado por “bico injetor 1”, e também para o bico que passou com maior frequência na linha naquele período, o “bico injetor 2”, ilustrado na Figura 9 (b). Nota-se que a eficiência de usinagem para o bico injetor 1 sofreu pouca variação, mostrando inclusive um aumento de eficiência após uma correção em 30h de usinagem. Porém, para o bico injetor 2 houve variação após 100h acumuladas de usinagem. Essa grande queda da eficiência indica que houve degradação do fluido abrasivo. São destacados para esse componente os pontos onde houve alteração de concentração de partículas abrasivas realizadas pelos operadores e pelas correções. Mesmo com as correções e alterações implementadas pelos operadores a eficiência permaneceu baixa. Não há dados sobre a eficiência de usinagem para o bico 1 após as 100h de processo pois esse componente não passou novamente na linha nesse período.



(a)



(b)

Figura 9. Variação da eficiência para dois bicos injetores diferentes.

A distribuição granulométrica do tamanho de partículas não se manteve constante ao longo do tempo. Como é possível observar na Figura 10 (a), ao final do período de produção havia maior frequência de partículas maiores do que no início do processo. As partículas encontradas no tanque de lavagem são as de maior tamanho, como ilustra a Figura 10 (b). Ou seja, apesar da manutenção da viscosidade houve perda de partículas durante o processo e reposição excessiva de partículas grandes, o que fez com que a distribuição granulométrica de partículas do fluido abrasivo fosse alterada.

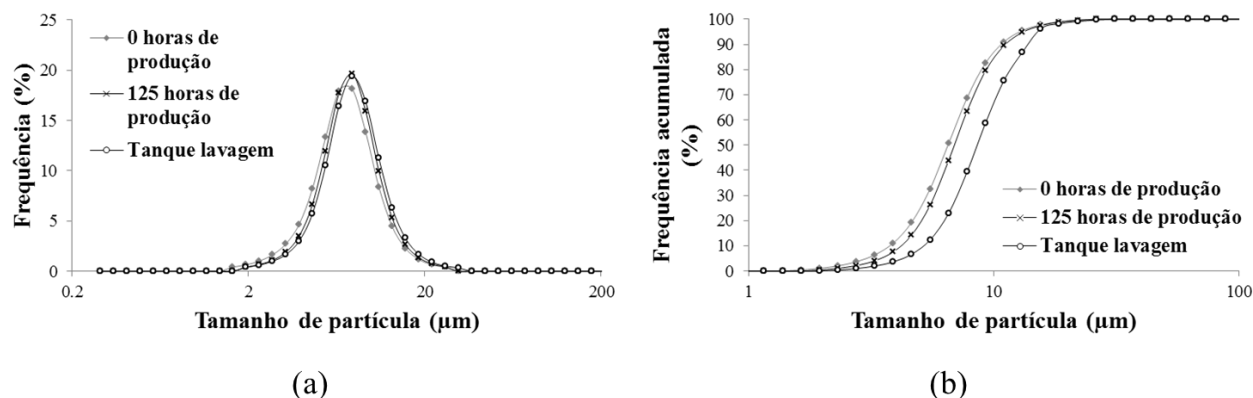


Figura 10. Distribuição granulométrica de partículas ao longo do período de produção com correção da quantidade de partículas abrasivas.

É possível compreender porque ocorre a perda de partículas abrasivas observando a variação do grau de acoplamento das partículas, que descreve a tendência das partículas seguirem as linhas de fluxo do fluido. O grau de acoplamento foi calculado para os diâmetros equivalentes de três percentis da distribuição granulométrica, d_{10} , d_{50} e d_{90} . Esses valores são obtidos na curva de distribuição granulométrica acumulada, como a da Figura 10 (b), por exemplo, o d_{10} é o tamanho de partícula equivalente aos 10% da frequência acumulada. Na Tabela 1 são apresentados os valores do grau de acoplamento calculados para o tempo inicial de monitoramento, e para as amostras coletadas logo antes das correções de viscosidade e logo depois. As células em verde indicam grau de acoplamento alto ($\lambda < 0,5$), em amarelo intermediário ($0,5 \leq \lambda \leq 1$) e em vermelho acoplamento baixo ($\lambda > 1$).

Como os percentis d_{10} e d_{50} representam apenas partículas menores não há variação do grau de acoplamento para esses valores, pois o grau de acoplamento é diretamente proporcional ao tamanho da partícula, quanto menor essa for mais bem acoplada ao fluido estará. O percentil d_{90} engloba também as partículas de tamanho maior, que tendem a não acompanhar as linhas de fluxo do fluido por apresentarem grau de acoplamento menor. É possível observar que antes das correções (amostras D5, D10 e D15) o grau de acoplamento é baixo, em consequência da viscosidade que também é baixa. Após as correções, com o aumento da viscosidade o acoplamento das partículas passa a ser intermediário.

O aumento de viscosidade após as correções aumenta o grau de acoplamento das partículas, isso é importante para que haja menor perda dessas durante a usinagem, economizando material e mantendo a concentração constante.

Tabela 1. Valores do grau de acoplamento das amostras do fluido abrasivo com diferentes tempos de processo

Amostra	Viscosidade (mPas)	Diâmetro (μm)			Grau de acoplamento		
		d_{10}	d_{50}	d_{90}	λ_{10}	λ_{50}	λ_{90}
D1	56,16	3,75	6,5	10,71	0,1015	0,3049	0,8277
D5	44,4	3,72	6,44	10,61	0,1263	0,3785	1,027
Correção							
D6	51,95	3,85	6,59	10,81	0,1156	0,3388	0,9112
D10	40,88	3,85	6,58	10,81	0,1469	0,4292	1,158
Correção							
D11	53,93	4,01	6,69	10,83	0,1208	0,3363	0,881
D15	41,52	4,06	6,74	10,91	0,1609	0,4434	1,1613
Correção							
D16	51,6	4,18	6,86	11,02	0,1372	0,3696	0,9534

É possível perceber que com o passar do tempo de produção o diâmetro médio das partículas aumentou para os três percentis. Para o d_{10} houve um aumento de 11,5%, d_{50} 5,5% e para d_{90} 2,9%. As partículas maiores perdem-se durante o processo pela falta de acoplamento, mas uma parte delas também é perdida em pequenos vazamentos que ocorrem durante o processo de usinagem. Nesses vazamentos partículas de tamanho menor também se perdem e não são repostas quando se utiliza o abrasivo modificado. Isso causa então uma redução na frequência de partículas menores, refletindo no aumento médio de diâmetro do percentil d_{10} . Quando o abrasivo convencional foi utilizado para as correções de concentração não foi encontrado um aumento do valor médio dos percentis, pelo contrário há uma pequena redução do diâmetro, entre 4 – 2%, considerada não significativa para o processo.

Para comparar o efeito da adição do abrasivo modificado foi escolhida uma amostra da segunda etapa de investigação onde as correções eram feitas com o abrasivo convencional, e uma do atual com o abrasivo modificado, com viscosidades próximas. A amostra escolhida do primeiro monitoramento foi coletada com $t_h = 160h$ e a do segundo monitoramento com $t_h = 120h$. A Tabela 2 apresenta os valores do grau de acoplamento para as duas amostras. O acoplamento das partículas com fluido para os percentis d_{10} e d_{50} são altos e possuem valores parecidos. Já para o percentil d_{90} ainda que ambos estejam na faixa de acoplamento intermediário por causa da alta viscosidade, o grau de acoplamento da amostra com abrasivo convencional é maior do que com o abrasivo modificado. Isso acontece, pois, os valores do tamanho de partícula são menores na primeira fase e isso faz com que essas fiquem mais bem acopladas ao fluido. A maior frequência de partículas grandes apresentada no abrasivo modificado aumenta o diâmetro do percentil d_{90} , porém como já discutido anteriormente o tamanho de partícula é diretamente proporcional ao valor do grau de acoplamento. Nesse caso repor apenas as partículas maiores não é eficiente, pois elas continuarão apresentando baixo acoplamento ao fluido e tenderão a se perder durante a usinagem.

Tabela 2. Variação do grau de acoplamento com a variação do tipo de abrasivo utilizado para a correção.

Amostra	Viscosidade (cP)	Diâmetro (μm)			Momento de equilíbrio		
		d_{10}	d_{50}	d_{90}	λ_{10}	λ_{50}	λ_{90}
Abrasivo convencional	51,0	3,75	6,2	10,24	0,1012	0,3054	0,8329
Abrasivo modificado	51,6	4,18	6,86	11,02	0,1372	0,3696	0,9534

5. PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista os resultados alcançados nesta etapa da investigação, um monitoramento on-line parece ser promissor no sentido de controlar as variações das propriedades do fluido abrasivo ao longo do processo. Dessa forma, imagina-se que ao invés de ser feitas reposições de abrasivos diferenciados em tempos maiores de processamento, a correção mais sistemática da viscosidade do óleo em conjunto com a manutenção da concentração de partículas possa manter a eficiência do processo constante por longos períodos de tempo.

Técnicas ópticas serão aplicadas para tal finalidade, tais como refratometria e espectroscopia Raman, utilizadas na análise de óleos (Kawano et al, 2015). Os resultados dessas análises serão relacionados com curvas de viscosidade dos diferentes óleos usados no processo, de modo que o controle se dê por meio desta correlação entre propriedade óptica e mecânica.

Para a concentração dos abrasivos, o investimento inicial será feito por meio da técnica de impedância, que vem sendo utilizada para este fim em outras aplicações (Santos et al, 2016). O conjunto de resultados também será relacionado com a caracterização reológica, dado que a concentração de partículas altera a viscosidade do meio.

6. CONCLUSÕES

A partir dos dados apresentados é possível concluir sobre a terceira etapa da investigação do processo de hidroerosão que:

- É possível manter a viscosidade dentro da faixa de 40 – 55 mPas quando são promovidas correções sistemáticas da viscosidade do fluido abrasivo.
- A adição do abrasivo modificado não fez com que a distribuição de partículas se mantivesse constante com o passar do tempo, houve um deslocamento da curva para a direita. Ou seja, houve aumento da frequência de partículas com diâmetro maior.
- Após as correções de viscosidade o grau de acoplamento das partículas ao fluido aumentou, para todos os tamanhos de partículas. Porém as partículas maiores, representadas pelo percentil d_{90} , ainda apresentavam um grau de acoplamento intermediário. Por apresentarem esse grau de acoplamento menor, essas partículas estariam sujeitas a se perder durante a usinagem, e ao ficarem depositadas nos bicos injetores seriam levadas para o tanque de lavagem. O que pode ser comprovado observando a distribuição granulométrica das partículas encontradas no tanque de lavagem, que contém uma frequência alta de partículas grandes.
- Comparando o grau de acoplamento de amostras de mesma viscosidade da segunda e terceira etapas de monitoramento observa-se que o diâmetro médio das partículas maiores aumentou na terceira fase, e consequentemente o grau de acoplamento diminuiu.
- A eficiência de usinagem para o bico injetor 2 caiu após as 100h de usinagem, e mesmo com correções e alterações promovidas pelos operadores ela não voltou a subir.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Robert Bosch Ltda, que apoiou as diferentes etapas de investigação por meio dos seguintes convênios: ACT 11/2011, ACT 02/2013, ACT 14/2014 e ACT 12/2016.

8. REFERÊNCIAS

- Coseglio, M. S. D. R., 2013, “Análise da eficiência do processo de usinagem por hidroerosão sem renovação de partículas abrasivas.”, Dissertação de mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.
- Coseglio, M. S. D. R., Moreira, P.P., Procopio, H.L., Pintaude, G., 2016, “Analysis of the efficiency of hydroerosive grinding without renewal of abrasive particles”, Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol. 138, paper 031007.
- Diver, C., Atkinson, J., Befrui, B., Helml, H.J., Li, L., 2007, “Improving the geometry and quality of a micro-hole fuel injection nozzle by means of hydroerosive grinding”. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, vol. 221 Part B: Journal of Engineering Manufacture, pp. 1-9.
- Freitag, A., 2011, “The rise of today’s clean diesel vehicles: performance, benefits and market growth”, Diesel Technology forum, Washington, D.C., pp. 1-29.
- Gov, K., Eyercioglu, O., 2016, Effects of abrasive types on the surface integrity of abrasive-flow-machined surfaces, in Press: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, pp. 1-10.
- Humphrey, J., 1990, “Fundamentals of fluid motion in erosion by solid particle impact”, International Journal of Heat and Fluid Flow, Volume 11, No. 3, pp. 170-195
- Kawano, M. S., Kamikawachi, R. C., Fabris, J. L., Muller, M., 2015, “Thermally assisted sensor for conformity assessment of biodiesel production”, Measurement Science & Technology, Volume 26, pp. 1-8.
- Moreira, P. P., 2015, “Ajuste da viscosidade do fluido erosivo para manutenção da eficiência do processo de usinagem por hidroerosão” Dissertação de mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.
- Moreira, P. P., Grabarski, M. I., Pintaude, G., 2015, “Maintenance of Hydroerosive Grinding Process Efficiency based on the Abrasive Fluid Viscosity”, VII Brazilian Conference on Rheology – BCR 2015, pp. 1-4.
- Santos, E. N., Schleicher, E., Reineke, S., Hampel, U., Silva, M. J., 2016, “Quantitative cross-sectional measurement of solid concentration distribution in slurries using a wire-mesh sensor”, Measurement Science & Technology, Volume 27, pp 1-9.
- Weickert, M., 2011, “Experimental and numerical investigation of the hydroerosive grinding”, Powder Technology, Vol. 214, pp. 1 -13.
- Wendt, E.L.S. ; Coseglio, M.S.R. ; Moreira, P. P. ; Pintaúde, G., 2013, “Efeito das propriedades do fluido erosivo no processo de hidroerosão.” 7º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, ABCM. Artigo COBEF2013-0292.

Marina Izabelle Grabarski, marina.grabarski@ifpr.edu.br¹
Diandra Grossmann Pereira, diandragrossmann@gmail.com²
Giuseppe Pintaúde, pintaude@utfpr.edu.br²

¹IF-PR, Campus Paranaguá, Paranaguá, Brasil.

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Departamento Acadêmico de Mecânica, Curitiba, Brasil.

Hydroerosive grinding is a key process to produce diesel nozzles. Its efficiency in rounding the holes depends on the physical properties of abrasive fluid. This manuscript revises some attempts to keep constant the characteristics of abrasive fluid along the production time. Previous findings (Coseglio et al, 2016) showed that the renewal of high-viscosity mineral oil together with relatively large particles could be a suitable solution for that, but some difficulties were verified and they are presented here. Perspectives of future research in this kind of processing are also described, meaning the introduction of new techniques for characterization.

Key-words: *Hydroerosive grinding, process efficiency, viscosity, size distribution of particles.*