



**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**CAMPUS DE CURITIBA**  
**DEPARTAMENTO DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**E DE MATERIAIS - PPGEM**

**PÂMELA PORTELA MOREIRA**

**AJUSTE DA VISCOSIDADE DO FLUIDO EROSIVO**  
**PARA MANUTENÇÃO DA EFICIÊNCIA DO**  
**PROCESSO DE USINAGEM POR HIDROEROSÃO**

**CURITIBA**

**MARÇO - 2015**

**Pâmela Portela Moreira**

**AJUSTE DA VISCOSIDADE DO FLUIDO EROSIVO  
PARA MANUTENÇÃO DA EFICIÊNCIA DO  
PROCESSO DE USINAGEM POR HIDROEROSÃO**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Área de Concentração em Engenharia de Materiais, do Departamento de Pesquisa e Pós-Graduação do Campus de Curitiba da UTFPR.

**Orientador:** Prof. Giuseppe Pintaúde, Dr.

**CURITIBA**

**MARÇO - 2015**

## TERMO DE APROVAÇÃO

PÂMELA PORTELA MOREIRA

# **AJUSTE DA VISCOSIDADE DO FLUIDO EROSIVO PARA MANUTENÇÃO DA EFICIÊNCIA DO PROCESSO DE USINAGEM POR HIDROEROSÃO**

Este Projeto de Dissertação foi julgado para a obtenção do título de mestre em engenharia, área de concentração em engenharia de materiais, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais.

---

Prof. Paulo César Borges, Dr.  
Coordenador de Curso

### **Banca Examinadora**

---

Prof. Giuseppe Pintaúde, Dr.  
(UTFPR)

---

Prof. Admilson Teixeira Franco, Dr.  
(UTFPR)

---

Prof<sup>a</sup>. Maria Adelina Santos Araújo, Dra.  
(Universidade Petrobras)

Curitiba, 12 de Março de 2015

*Ao meu esposo Tiago e à minha família,  
pela compreensão e apoio.*

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Giuseppe Pintaúde pela parceria no projeto realizado em conjunto com a empresa Robert Bosch e também por toda sua dedicação, incentivo e conhecimentos transmitidos durante a orientação deste trabalho.

À empresa Robert Bosch, principalmente na figura dos Srs. Zequiel Stella, Marcos Marocki e Joelcio Benvenuti, pelo incentivo durante a execução do projeto, pela disponibilização do equipamento de hidroerosão, laboratórios, materiais de consumo e mão de obra para os testes, além da bolsa de estudos dos alunos de iniciação científica que participaram do projeto (Acordo de Cooperação Técnica ACT-UTFPR 02/2013).

À Fundação Araucária, pelo projeto "Aquisição de Equipamentos e acessórios complementares a atualização e expansão das atividades de pesquisa dos Programas de Pós-Graduação dos Câmpus Curitiba, Pato Branco e Ponta Grossa", edital 06/2013 Programa Complementar Pró-Equipamentos CAPES.

A todos os Professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais (PPGEM) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pela contribuição durante o curso de mestrado.

Aos alunos de iniciação científica Elis Marina Wendt, Henrique Procópio e Marina Isabella Grabarski pela dedicação e comprometimento durante a execução do trabalho. E também ao doutorando Mario Coseglio, cuja dissertação de mestrado serviu de base para a continuidade dos estudos na área de Hidroerosão de Bicos Injetores.

Aos Professores, Alunos e Técnicos do Laboratório de Ciências Térmicas (LACIT) da UTFPR pelas discussões e suporte para utilização dos equipamentos.

Ao Professor Dr. Carlos Marcus Gomes Cruz, ao Professor Dr. Julio Cesar Rodrigues Azevedo e ao Acadêmico Rafael Kramer pelo suporte com as análises de espectrometria de massa realizadas no LEAQUA (Laboratório de estudos avançados em Química Ambiental) do DAQBI – Departamento de Química e Biologia da UTFPR, além das discussões e interpretação dos resultados.

Ao Professor Dr. Rigoberto Eleazar M. Morales e ao Professor Dr. Marco José da Silva, pelos comentários e dicas para direcionamento do trabalho durante a apresentação do Projeto de Dissertação para qualificação.

MOREIRA, Pâmela Portela, **AJUSTE DA VISCOSIDADE DO FLUIDO EROSIVO PARA MANUTENÇÃO DA EFICIÊNCIA DO PROCESSO DE USINAGEM POR HIDROEROSÃO**, 2015, Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

## RESUMO

O processo de usinagem por hidroerosão é utilizado em bicos injetores do sistema diesel para melhorar seu desempenho a partir do arredondamento do raio de entrada dos canais de injeção por onde escoava o diesel para injeção no motor. A eficiência do processo de usinagem por hidroerosão está relacionada às condições do fluido erosivo utilizado no processo, sendo que a viscosidade desempenha papel fundamental para manutenção da eficiência. O acoplamento das partículas abrasivas com o fluido é afetado pela redução da viscosidade que ocorre durante o processo, influenciando assim a eficiência de remoção de material e trazendo perdas de produtividade para o processo, que se torna mais lento para que se atinja a remoção de material especificada. No trabalho em questão, a eficiência do processo foi avaliada durante 160 horas, utilizando correção da viscosidade do fluido erosivo para manutenção da viscosidade próxima à condição inicial de trabalho. A causa para a redução da viscosidade também foi investigada, a partir da avaliação de uma possível contaminação do fluido erosivo por outros fluidos de menor viscosidade existentes no processo. Após 160 horas de monitoramento aplicando-se correção da viscosidade, observou-se a ocorrência de redução da viscosidade do fluido erosivo de 8,8 % considerando a primeira e a última amostra, além de uma redução na eficiência do processo de apenas 4,2 %, em detrimento a uma redução de 20 % observada em estudo anterior, no qual não houve renovação de partículas e ajuste da viscosidade. A contaminação do fluido erosivo pelo óleo de exame utilizado na estação anterior à de usinagem por hidroerosão se mostrou responsável por 37,5 % da redução da viscosidade do fluido ao longo de 40 horas de trabalho.

**Palavras-chave:** usinagem, hidroerosão, viscosidade, partícula, erosivo.

MOREIRA, Pâmela Portela, **Adjustment on the erosive fluid viscosity for maintenance of hydroerosive grinding process efficiency**, 2015, Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

## ABSTRACT

Hydroerosive grinding process is used on nozzle injectors for diesel system in order to improve its performance by rounding the internal diameter of the injection channels through which flows the diesel for injection in the engine. The efficiency of hydroerosive grinding process is related to the conditions of the erosive fluid used in the process, for which viscosity has a major role for efficiency maintenance. Coupling between particles and fluid is affected by viscosity decrease along time, thus influencing material removal rate efficiency and causing productivity losses, once cycle time increases to achieve the specified material removal rate. In the present investigation, the process efficiency was evaluated during 160 hours using viscosity correction of the erosive fluid in order to keep viscosity close to its initial work condition. The root cause for viscosity decrease was also investigated through evaluation of possible contamination of the erosive media by lower viscosity fluids existing in the process. After 160 hours of process monitoring with viscosity adjustment, it was observed 8,8 % of viscosity reduction considering the first and the last samples, besides that the material removal rate efficiency decreased only 4,2 % over 20 % decrease observed in a previous study related to hydroerosive grinding process without particle replacement and viscosity adjustment. Contamination of the erosive fluid by measurement oil used in the previous station was responsible for 37,5 % of viscosity decrease along 40 hours of production.

**Keyword:** hydroerosive grinding, viscosity, particles, abrasive.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
ABSTRACT .....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	x
LISTA DE TABELAS .....	xii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xiii
1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Contexto .....	16
1.2 Caracterização do problema e justificativa .....	17
1.3 Objetivo da dissertação .....	18
1.4 Estrutura do trabalho.....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	21
2.1 Processo de hidroerosão .....	21
2.2 Óleos lubrificantes de base mineral .....	26
2.3 Propriedades físicas dos óleos lubrificantes .....	28
2.3.1 Viscosidade .....	28
Viscosidade dinâmica.....	28
Viscosidade cinemática.....	29
2.4 Estimativa da viscosidade para mistura de óleos lubrificantes .....	31
2.4.1 Estabilidade termo-oxidativa de óleos lubrificantes .....	34
2.5 Técnicas para monitoramento da condição de óleos lubrificantes .....	35
3 METODOLOGIA .....	39
3.1 Descrição.....	39
3.2 Equipamento de hidroerosão .....	39
3.3 Fluidos e partículas envolvidos no processo atual.....	42
3.4 Ajuste da viscosidade do fluido erosivo .....	44
3.4.1 Sistemática de ajuste da viscosidade do fluido erosivo .....	45
Etapa 1	46
Etapa 2	46
Etapa 3	47
Etapa 4	50
Etapa 6	51
Etapa 7	51
3.5 Avaliação da causa raiz para a redução da viscosidade do fluido erosivo.....	53
3.5.1 Interações entre as estações do equipamento de hidroerosão .....	53
3.5.2 Simulação da contaminação do óleo de processo.....	54
3.5.3 Análise por espectrometria de massa .....	56
4 RESULTADOS .....	58
4.1 Caracterização do fluido erosivo (Etapa 3) .....	58
4.1.1 Concentração volumétrica de sólidos .....	58



4.1.2	Viscosidade do óleo filtrado a partir do fluido erosivo.....	59
4.1.3	Distribuição de tamanho de partículas e análise do acoplamento.....	60
4.2	Avaliação da eficiência da correção da viscosidade (Etapa 7).....	62
4.3	Avaliação da causa raiz para a redução da viscosidade do fluido erosivo.....	63
4.3.1	Análise de espectrometria de massa e cromatografia gasosa .....	65
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	68
5.1	Efeito do ajuste de viscosidade do fluido erosivo na eficiência da usinagem por hidroerosão 68	
5.2	Análise da causa raiz da redução de viscosidade do fluido erosivo.....	72
6	CONCLUSÃO.....	75
7	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....	77
8	REFERÊNCIAS .....	78
	APÊNDICE A – COBEF 2013 .....	81
	APÊNDICE B – resultados de Viscosidade dinâmica das amostras .....	90
	APÊNDICE C – TABELA DE REFERÊNCIA PARA AJUSTE DA VISCOSIDADE DO FLUIDO EROSIVO.....	91

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Imagem MEV do arredondamento (a) antes do processo de hidroerosão (b) após o processo de hidroerosão (FREITAG, 2011).....	16
Figura 2.1 - Esquema do arredondamento em uma contração abrupta (a) antes do processo de HE e (b) após processo de HE (COSEGLIO, 2013).....	22
Figura 2.2 - (a) Esquema da evolução da geometria durante o processo HE e (b) principais etapas do processo HE (Adaptado de POTZ <i>et al.</i> , 2000) .....	23
Figura 2.3 - Diagrama explicativo dos diferentes estados do momento de equilíbrio	24
Figura 2.4 - Ilustração do acúmulo de partículas com alto momento de equilíbrio no fundo do canal principal do bico injetor (COSEGLIO, 2013) .....	25
Figura 2.5 - Diagrama esquemático de um viscosímetro de cilindro rotativo (Adaptado de STACHOWIAK e BATCHELOR, 1993).....	30
Figura 2.6 - Diagrama esquemático de um viscosímetro de cone rotativo (Adaptado de STACHOWIAK e BATCHELOR, 1993) .....	31
Figura 2.7 - Determinação da viscosidade final de uma mistura a partir da ASTM (Adaptado de STACHOWIAK e BATCHELOR, 1993).....	32
Figura 3.1 - Diagrama das estações do processo de usinagem por hidroerosão (COSEGLIO, 2013).....	41
Figura 3.2 - Comportamento da viscosidade do fluido erosivo no processo padrão (Adaptado de COSEGLIO, 2013).....	44
Figura 3.3 - Esquema do sentido de transporte dos fluidos do processo de hidroerosão .....	54
Figura 3.4 - Óleo de exame retido nos bicos injetores restante após a extração do óleo residual com hexano. ....	55
Figura 3.5 – Rampa de aquecimento para análise de espectrometria de massa.....	57
Figura 4.1 - Viscosidade das amostras do fluido erosivo filtrado a 25°C.....	59
Figura 4.2 – Distribuição de frequência de tamanho de partículas em volume para a amostra A1 .....	60

Figura 4.3 – Distribuição de frequência de tamanho de partículas em volume para a amostra A7 .....	61
Figura 4.4 - Taxa média de arredondamento .....	62
Figura 4.5 - Cromatograma da amostra A1 .....	65
Figura 4.6 - Cromatograma da amostra A5.....	66
Figura 4.7 - Cromatograma da amostra A6.....	66
Figura 4.8 - Cromatograma da amostra A10.....	67
Figura 4.9 - Cromatograma das amostras A1, A5, A6 e A10 .....	67
Figura 5.1 - Comparativo entre resultados de viscosidade em diferentes estudos ...	69
Figura 5.2 - Porcentagem em volume de partículas de acordo com o acoplamento para a amostra A1.....	70
Figura 5.3 - Porcentagem em volume de partículas de acordo com o acoplamento para a amostra .....	71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Modelos para cálculo de viscosidade de uma mistura .....	33
Tabela 3.1 - Identificação das estações do equipamento de hidroerosão.....	40
Tabela 3.2 - Propriedades do óleo de exame do fluxo volumétrico (Fonte: Zeller Gmellin, 2013).....	42
Tabela 3.3 - Propriedades do óleo de processo (Fonte: Zeller Gmellin, 2013) .....	43
Tabela 3.4 - Parâmetros de distribuição de tamanho de partículas de carbeto de boro, $d_{10}$ , $d_{50}$ e $d_{90}$ , do abrasivo novo (Apêndice A) .....	43
Tabela 3.5 - Propriedades do óleo aditivo (Fonte: Zeller Gmellin, 2014) .....	45
Tabela 3.6 - Etapas do procedimento de correção da viscosidade do fluido erosivo	45
Tabela 3.7 - Dados gerais do monitoramento .....	47
Tabela 3.8 - Dados gerais sobre as análises realizadas .....	48
Tabela 4.1 - Concentrações volumétricas do fluido erosivo (amostras A1, A4, A8, A13 e A17) .....	58
Tabela 4.2 - Parâmetros de distribuição de tamanho de partículas de carbeto de boro, $d_{10}$ , $d_{50}$ e $d_{90}$ .....	61
Tabela 4.3 - Taxa média de arredondamento (%) das amostras. ....	63
Tabela 4.4 - Variação da viscosidade em função da adição do óleo de exame .....	65
Tabela 5.1 - Comparativo entre o estudo de COSEGLIO (2013) e o trabalho atual no que se refere ao acoplamento das partículas .....	72
Tabela 0.1 - Viscosidades dinâmicas das amostras A1 a A19 do óleo filtrado .....	90

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras Romanas

$Q$	Fluxo volumétrico no canal de injeção antes da hidroerosão	$L^3 T^{-1}$
$Q_{HE}$	Fluxo volumétrico no canal de injeção após a hidroerosão	$L^3 T^{-1}$
$Q_{min}$	Fluxo volumétrico mínimo de especificação do bico injetor	$L^3 T^{-1}$
$Q_{max}$	Fluxo volumétrico máximo de especificação do bico injetor	$L^3 T^{-1}$
$r_{he}$	Raio de arredondamento do canal de injeção	L
$\vec{U}_f$	Velocidade do fluido	$LT^{-1}$
$r_b$	Raio do cilindro interno do viscosímetro rotacional	L
$r_c$	Raio do cilindro externo do viscosímetro rotacional	L
$k$	Constante de viscosidade	$L^{-3}$
$M$	Torque de cisalhamento no cilindro interno	$ML^2 T^{-2}$

### Letras Gregas

$\lambda$	Momento de equilíbrio	Adimensional
$\mu_f$	Viscosidade dinâmica do fluido	$ML^{-1} T^{-1}$
$\rho_p$	Densidade da partícula	$ML^{-3}$
$\eta$	Viscosidade dinâmica	$ML^{-1} T^{-1}$
$\tau$	Tensão de cisalhamento	$ML^{-1} T^{-2}$
$\nu$	Viscosidade cinemática	$L^2 T^{-1}$
$\rho$	Densidade do fluido	$ML^{-3}$
$\omega$	Velocidade angular	$T^{-1}$

### Abreviaturas e siglas

ASTM – American Society of Testing and Materials

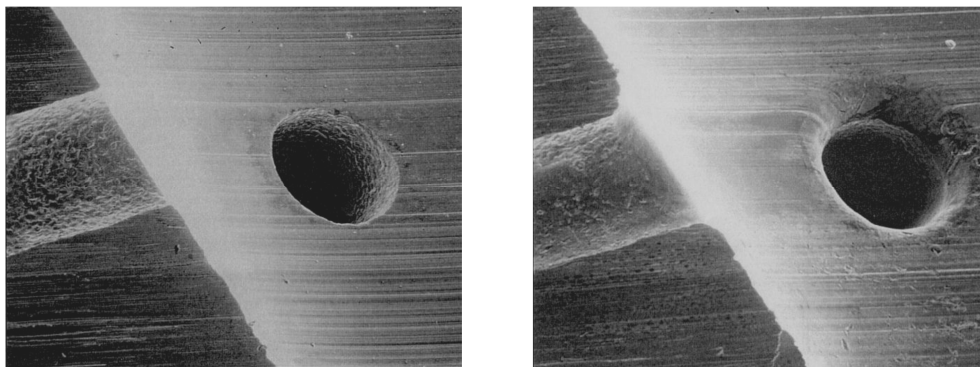
FTIR – Fourier Transform Infrared Spectroscopy

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contexto

O sistema de injeção de motores diesel vem despertando maior atenção nos últimos anos, uma vez que o seu correto funcionamento e a qualidade da mistura ar-combustível influenciam no desempenho do motor e também no nível de emissão de poluentes. Um dos principais componentes do sistema de injeção é o bico injetor, que possui extrema precisão e é responsável por nebulizar finamente o combustível na câmara de combustão do motor, sendo que quanto melhor for a nebulização, maior será o rendimento do motor (PAYRI *et al*, 2004).

Dentro do bico injetor, o combustível passa por canais de injeção, que possuem tipicamente diâmetros entre 100  $\mu\text{m}$  e 200  $\mu\text{m}$  e podem ser produzidos pelo processo de eletroerosão (DIVER, 2007). Devido à geometria dos canais de injeção, após processo de eletroerosão, é necessária uma etapa de arredondamento dos canais com o uso processo de hidroerosão, responsável pela redução da rugosidade superficial e pelo arredondamento das transições internas, visando minimizar falhas por fadiga e perda de carga no processo de injeção. A alteração do aspecto do canal de injeção pode ser verificada na imagem obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da Figura 1.1.



(a)

(b)

Figura 1.1 - Imagem MEV do arredondamento (a) antes do processo de hidroerosão (b) após o processo de hidroerosão (FREITAG, 2011)

De acordo com POTZ *et al* (2000), o processo de hidroerosão melhora a eficiência do *spray* de diesel na saída dos furos de injeção, promovendo um melhor desempenho do sistema de injeção e benefícios ambientais, uma vez que este melhor desempenho leva a uma redução de emissões de poluentes. O principal efeito do arredondamento é o aumento do fluxo volumétrico no interior do componente, sendo que este fluxo é especificado pelo cliente final do bico injetor e depende das especificações do motor a diesel.

Um dos fatores mais importantes do processo de hidroerosão é o fluido erosivo, composto por partículas abrasivas de alta dureza dispersas em um fluido, geralmente óleo mineral, com viscosidade relativamente baixa. A remoção de material se dá por meio do impacto das partículas abrasivas com a superfície dos canais, provocando seu arredondamento. A taxa média de arredondamento é consequência do atingimento do fluxo volumétrico especificado para cada tipo de bico injetor. Dentro deste contexto, a viscosidade representa um papel fundamental na manutenção da eficiência do fluido erosivo, uma vez que está intimamente relacionada com o acoplamento das partículas abrasivas no fluido erosivo (COSEGLIO, 2013).

## 1.2 Caracterização do problema e justificativa

O processo de hidroerosão é utilizado na planta industrial da Robert Bosch em Curitiba para o arredondamento interno dos canais de injeção de bicos injetores para motores que operam sob o ciclo diesel. Analisando-se os dados da linha de produção de bicos injetores, pode-se observar um aumento gradual do tempo de ciclo de processamento, ou seja, um aumento no tempo necessário para que se atinja o fluxo volumétrico especificado no interior dos bicos injetores. Este aumento do ciclo está relacionado a uma redução da eficiência de remoção de material dos canais de injeção observada após um determinado período de processamento sem intervenção no fluido erosivo circulante.

Conforme apresentado nos estudos de COSEGLIO (2013), a alteração na composição e nas características do fluido erosivo ao longo do tempo leva a uma redução da eficiência de remoção de material dos canais de injeção dos bicos injetores, aumentando assim o tempo de usinagem para atingimento do fluxo

volumétrico em seu interior. A redução da viscosidade do óleo e a perda de partículas abrasivas para o sistema são apontadas no estudo como os fatores que mais contribuem para a redução da eficiência na remoção de material. Cabe ressaltar que a densidade do óleo também foi analisada por COSEGLIO (2013), porém esta mostrou-se estável ao longo do tempo e, por este motivo, não foi relacionada à redução de eficiência que ocorre no processo de hidroerosão.

Para que a eficiência do processo seja mantida de forma mais estável, a empresa adota atualmente um procedimento de renovação de partículas abrasivas a partir da adição de novas partículas no sistema, toda vez que se detecta o aumento do tempo do ciclo característico de determinado bico injetor. Esta sistemática é empírica e depende da atuação e da experiência dos operadores que controlam o equipamento de hidroerosão. Conforme levantamento realizado pela Bosch, o custo anual despendido com as partículas abrasivas de carbetto de boro ( $B_4C$ ) utilizadas no processo de hidroerosão figuram entre os 10 itens de custo mais alto entre os materiais de consumo, sendo, portanto, um motivador para que soluções alternativas sejam encontradas de forma a reduzir o impacto econômico gerado no processo de hidroerosão.

Uma vez avaliados os fatores que mais contribuem para a redução da eficiência na remoção de material, faz-se necessário definir uma metodologia de ajuste das características do fluido erosivo para que se possa atingir uma maior estabilidade da eficiência do processo.

### **1.3 Objetivo da dissertação**

Avaliar o efeito do ajuste da viscosidade do fluido erosivo na manutenção da eficiência do processo de usinagem por hidroerosão em canais de injeção de bicos injetores, a partir da adição sistemática de um óleo mineral com maior viscosidade ao fluido erosivo tradicionalmente usado e identificar as causas que levam à redução da viscosidade do fluido erosivo ao longo do tempo de usinagem.



## 1.4 Estrutura do trabalho

No Capítulo 1, o tema do trabalho foi contextualizado em relação a importância do processo de usinagem por hidroerosão e de seu fluido erosivo, que tem a viscosidade como um importante fator de eficiência a ser analisado. Em seguida, o problema, que consiste na avaliação dos motivos que levam à redução da viscosidade do fluido erosivo ao longo do tempo e uma análise do uso de um método de ajuste da viscosidade do fluido erosivo para minimizar a redução da eficiência do processo de usinagem, foi caracterizado e a justificativa para sua investigação foi descrita. Por fim, foram apresentados os objetivos gerais e específicos.

O Capítulo 2 traz a revisão bibliográfica, que se inicia com uma descrição resumida do processo de usinagem por hidroerosão e suas variáveis. A seguir é apresentada uma análise detalhada dos óleos minerais e suas propriedades físicas, servindo de base para a caracterização desses componentes do fluido erosivo. A propriedade física viscosidade foi abordada com uma visão sobre as técnicas para sua determinação, a relação entre viscosidade e temperatura e a determinação da viscosidade para mistura de óleos lubrificantes. O encerramento da revisão bibliográfica se dá com uma descrição sobre a estabilidade termo-oxidativa de óleos lubrificantes, além de técnicas para monitoramento da condição de óleos ao longo de sua vida útil.

No Capítulo 3 foi apresentada a metodologia utilizada para a determinação de uma sistemática para ajuste de viscosidade do fluido erosivo e também para análise de sua eficiência, além do método para determinação da causa da redução da viscosidade ao longo do tempo. Em termos gerais, a metodologia do trabalho consistiu no monitoramento do processo de hidroerosão durante 160 horas e da utilização do ajuste da viscosidade do fluido erosivo neste intervalo de tempo. Utilizou-se para tal um equipamento de hidroerosão para arredondamento dos canais de bicos injetores instalado na planta industrial da Robert Bosch em Curitiba. A seguir, foi realizada uma análise da eficiência do ajuste de viscosidade do fluido erosivo a partir de indicadores de eficiência de remoção de material e de uma comparação com estudos anteriores. Além disso, foram realizadas simulações para avaliar a possibilidade de contaminação do fluido erosivo por outros existentes no

processo e que possam justificar a redução da viscosidade do fluido erosivo ao longo do tempo.

Os resultados dos itens descritos no capítulo anterior são apresentados no Capítulo 4. A discussão dos resultados atingidos é realizada no Capítulo 5 e as conclusões do trabalho são mostradas no Capítulo 6. Por fim, nos Capítulos 7 e 8 são apresentadas respectivamente as sugestões para trabalhos futuros e as referências bibliográficas utilizadas para elaboração do trabalho.

No Apêndice A é apresentado o artigo publicado no 7º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF), que serviu de base para análise do processo de usinagem por hidroerosão sem renovação de partículas e óleo.

No Apêndice B são mostrados em detalhes os resultados das medições de viscosidade dinâmica do óleo filtrado.

No Apêndice C é mostrada uma tabela de referência para ajuste da viscosidade conforme orientação do fornecedor do óleo de processo e do óleo de correção.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica inicia com uma descrição do processo de usinagem por hidroerosão e apresentação das principais variáveis e parâmetros do processo, seguido pela análise da relação entre as variáveis viscosidade e tamanho de partículas a partir do estudo do momento de equilíbrio.

Na segunda parte, é apresentada uma análise detalhada dos óleos básicos minerais, abrangendo seu processo de obtenção, suas principais características e o uso de aditivos que visam minimizar o impacto de fatores que alteram as propriedades físicas dos óleos básicos lubrificantes.

Na terceira parte, a revisão discorre sobre a viscosidade, a mais importante propriedade física dos óleos lubrificantes, trazendo uma abordagem sobre técnicas para a sua determinação, a relação entre viscosidade e temperatura e a estimativa da viscosidade de mistura de diferentes óleos lubrificantes.

Por fim, é abordada uma descrição da estabilidade de óleos lubrificantes frente à temperatura e condições oxidantes, além de técnicas para monitoramento da condição de óleos lubrificantes ao longo de sua vida útil.

### 2.1 Processo de hidroerosão

De acordo com WEICKERT *et al* (2011), o processo de hidroerosão é baseado em dois principais elementos, sendo o primeiro um fluido erosivo, que consiste em uma fase sólida dispersa em um meio líquido e o segundo é o material alvo, que corresponde a superfície do material que sofrerá o processo de hidroerosão. A interação entre estes três elementos é um fenômeno altamente complexo e aleatório, o que o torna pouco previsível. A remoção de material no processo de hidroerosão se dá pela passagem do fluido erosivo pelas áreas confinadas, o que leva a um desgaste das arestas e da superfície do material, desgastando principalmente as áreas em que o escoamento do fluido erosivo é restringido, ocorrendo uma mudança de trajetória e um aumento de velocidade das partículas. O esquema da Figura 2.1 representa os canais de injeção antes e depois do processo de hidroerosão.

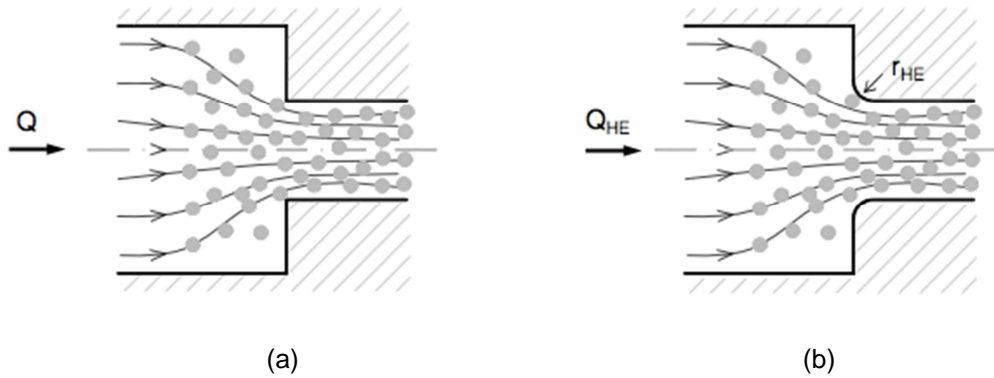


Figura 2.1 - Esquema do arredondamento em uma contração abrupta (a) antes do processo de HE e (b) após processo de HE (COSEGLIO, 2013).

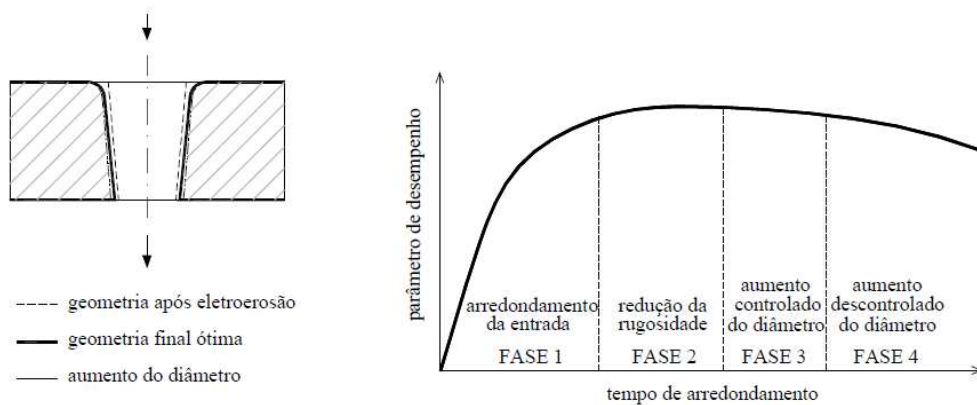
O efeito do processo de hidroerosão (HE) pode ser visualizado na

(a) (b)

Figura 2.2 a partir da mudança de geometria do canal por decorrência do arredondamento. Este processo pode ser dividido em quatro principais fases, conforme também apresentado na

(a) (b)

Figura 2.2, sendo que na primeira fase a geometria da entrada do canal sofre uma alteração com a formação de uma superfície favorável para o escoamento, resultando em uma rápida elevação do parâmetro de desempenho, que está parcialmente associado ao aumento do fluxo. Na Fase 2 a ocorre uma redução da rugosidade da superfície interna, sendo que na Fase 3 o diâmetro interno do canal aumenta sensivelmente, mas ainda de forma controlada. Por fim, na Fase 4 inicia-se um processo de aumento adicional do diâmetro interno do canal, que deve ser evitado para não resultar em danificações no canal ou desvios de especificação desejada (POTZ *et al*, 2000).



(a)

(b)

Figura 2.2 - (a) Esquema da evolução da geometria durante o processo HE e (b) principais etapas do processo HE (Adaptado de POTZ *et al.*, 2000).

O tempo de ciclo do processo é determinado a partir de uma especificação de fluxo volumétrico existente antes e após processo de hidroerosão, sendo que o ciclo é o tempo necessário para se elevar o fluxo volumétrico até o valor especificado para cada tipo de bico injetor após processo de hidroerosão. O valor do fluxo volumétrico a ser atingido é determinado pelo cliente do bico injetor de acordo com as especificações de injeção para cada tipo de motor. De acordo com POTZ *et al* (2000), o tempo de ciclo do processo está associado à taxa de remoção de material, que depende de diversos fatores como dureza da superfície, tamanho e geometria das partículas abrasivas, viscosidade do fluido, pressão, concentração volumétrica da fase sólida, entre outras características do escoamento e propriedades do material da peça submetida ao processo.

De acordo com HUMPHREY (1990), a interação entre a fase sólida e a fase líquida no processo de hidroerosão pode ser avaliada a partir do momento de equilíbrio da partícula  $\lambda$ . A representação do momento de equilíbrio definida pela equação (2.1), considera  $\rho_p$  como sendo a densidade da partícula,  $d_p$  como o diâmetro da partícula,  $\vec{U}_f$  é a velocidade do fluido na entrada do canal,  $\mu_f$  é a viscosidade do fluido e  $r_{he}$  é raio de arredondamento da entrada do canal, considerado constante como 30  $\mu\text{m}$ . Desta forma, o momento de equilíbrio determina o grau de acoplamento entre as partículas sólidas abrasivas e o óleo do fluido erosivo, representando a capacidade que a partícula sólida possui de responder às mudanças de velocidade e trajetória do fluido. Cabe ressaltar que de acordo com PEKER e HELVACI (2008), a velocidade da partícula está relacionada com o número de Reynolds da partícula, que fisicamente representa a razão entre as forças inerciais e viscosas das partículas para a ordem de grandeza do diâmetro do particulado.

$$\lambda = \frac{\rho_p d_p^2 \|\vec{U}_f\|}{18\mu_f r_{he}} \quad (2.1)$$

O diagrama da Figura 2.3, contém um resumo explicativo dos diferentes estados do momento de equilíbrio.

$\lambda \ll 1$	$\lambda \approx 1$	$\lambda \gg 1$
Predominância de forças viscosas; Partículas tendem a seguir as linhas de fluxo mais facilmente.	Estado Intermediário; Equilíbrio entre forças viscosas e inerciais; Difícil prever o comportamento das partículas.	Predominância de forças inerciais; Partículas não possuem tendência de seguir linhas de fluxo facilmente.
<b>Alto acoplamento entre partícula e fluido</b>	<b>Acoplamento Intermediário</b>	<b>Baixo acoplamento entre partícula e fluido</b>

Figura 2.3 - Diagrama explicativo dos diferentes estados do momento de equilíbrio

De acordo com HUMPHREY, 1990, se  $\lambda \gg 1$  as partículas apresentam uma alta inércia e respondem lentamente às mudanças da velocidade do fluido. Neste caso a partícula possui baixo acoplamento com o fluido. O contrário é observado quando  $\lambda \ll 1$ , em que a fase sólida possui um menor tempo de resposta e as partículas tendem a acompanhar as linhas de corrente do escoamento. Neste caso, em que há predominância das forças viscosas, as partículas sólidas respondem quase instantaneamente às variações de velocidade e de direção do escoamento do fluido e a partícula é considerada como tendo alto acoplamento com o fluido. Quando  $\lambda \approx 1$ , os efeitos das interações entre as fases não podem ser negligenciados, sendo que as forças inerciais e viscosas são aproximadamente equivalentes e a partícula é classificada como em condição de acoplamento intermediário.

Sendo assim, quanto maior o acoplamento ( $\lambda \ll 1$ ), maior será a possibilidade de as partículas manterem uma trajetória coincidente com as linhas de fluxo do escoamento para o interior dos canais de injeção, o que garante que a remoção de material ocorra de maneira mais eficiente. Desta forma, pode-se afirmar que partículas com alto acoplamento com o fluido ( $\lambda \ll 1$ ), favorecem a remoção de material. Ainda de acordo com a equação ((2.1), a viscosidade do óleo é inversamente proporcional ao momento de equilíbrio, ou seja, uma redução na

viscosidade significa um menor acoplamento e, por conseguinte, uma remoção de material menos eficiente, que se reflete diretamente na eficiência do processo (HUMPHREY, 1990).

Conforme observado por COSEGLIO (2013) a partir do monitoramento do processo de hidroerosão, ao longo do tempo ocorre uma redução da viscosidade do fluido erosivo e também a perda de partículas abrasivas maiores para o sistema, fato este detectado a partir da análise de distribuição de tamanho das partículas abrasivas encontradas na estação de enxágue dos bicos injetores, que ocorre após o processo de hidroerosão.

O estudo do momento de equilíbrio de HUMPHREY (1990) também pode ser utilizado para justificar a perda de partículas abrasivas maiores para o sistema, pois de acordo com a Figura 2.4, partículas com menor acoplamento ( $\lambda \gg 1$ ) tendem a desviar das trajetórias coincidentes com as linhas de fluxo do escoamento, acumulando-se assim no fundo do canal principal do bico injetor. Quando o bico injetor é deslocado automaticamente para a estação de enxágue, as partículas remanescentes no fundo do canal são eliminadas pela passagem do óleo de limpeza e acumuladas no tanque da estação de enxágue. Como a viscosidade do óleo diminui com o tempo de uso do fluido erosivo, é possível afirmar que o acúmulo de partículas maiores dispersas no fluido é mais acentuado no início e é reduzido gradativamente à medida que a viscosidade vai sendo reduzida.

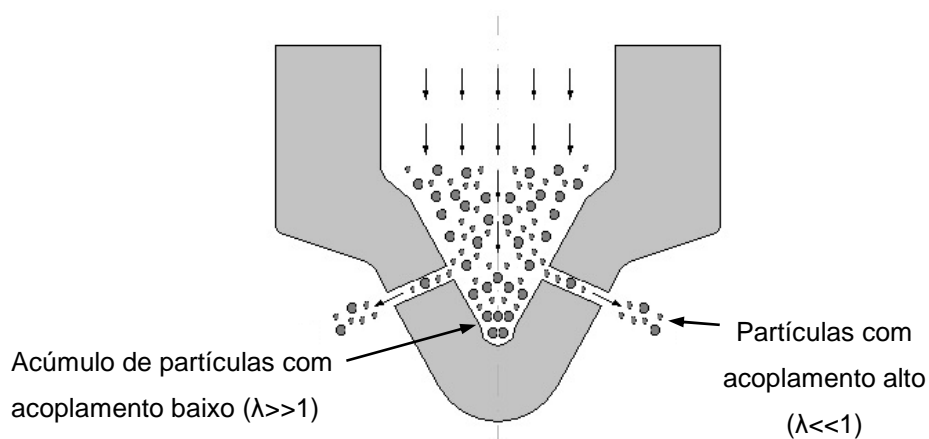


Figura 2.4 - Ilustração do acúmulo de partículas com alto momento de equilíbrio no fundo do canal principal do bico injetor (COSEGLIO, 2013)

## 2.2 Óleos lubrificantes de base mineral

Segundo BARTZ (1998), os óleos lubrificantes de base mineral representam aproximadamente 95% do mercado de óleos lubrificantes do mundo, sendo que a composição final de um óleo lubrificante comercial é de  $\approx$  60% a 90% de óleos básicos e o restante de aditivos, que variam de acordo com a aplicação e o desempenho esperado.

Os óleos básicos derivados do petróleo também chamados de minerais são obtidos a partir de frações do petróleo de alta massa molar, destiladas a vácuo e submetidas a processos de tratamento responsáveis pelo enquadramento das propriedades nas especificações sugeridas pelo mercado. Cada fração destilada dá origem a um óleo básico final, após passar por etapas de desaromatização, desparafinação e hidroacabamento na rota convencional de processo.

Segundo SPEIGHT (2001), os hidrocarbonetos encontrados no petróleo cru podem ser classificados nos seguintes tipos:

1. Parafinas - hidrocarbonetos saturados com cadeias lineares ou ramificadas, mas sem qualquer estrutura cíclica;
2. Cicloparafinas (naftênicos) - hidrocarbonetos saturados contendo um ou mais anéis, cada um dos quais pode ter uma ou mais cadeias laterais parafínicas (mais corretamente conhecidos como hidrocarbonetos naftênicos);
3. Aromáticos - hidrocarbonetos contendo um ou mais núcleos aromáticos isolados ou condensados que podem ter cadeias laterais parafínicas ou naftênicas.

Segundo STACHOWIAK e BATCHELOR (1993), o propósito das etapas de refino das frações lubrificantes é remover do refino é remover parafinas lineares ou pouco ramificadas de alta massa molar (desparafinação), hidrocarbonetos aromáticos, principalmente os polinucleados (desaromatização) e compostos contendo enxofre, oxigênio e nitrogênio (desaromatização e hidroacabamento). A presença de parafinas lineares ou pouco ramificadas pode provocar a solidificação do óleo à baixa temperatura, já os compostos aromáticos acentuam a queda da viscosidade do óleo com a temperatura e prejudicam a estabilidade termo-oxidativa do lubrificante, e finalmente, os compostos contendo heteroátomos (O, S, N)



também afetam negativamente a estabilidade e a resposta dos óleos lubrificantes aos aditivos usados nas formulações.

Os óleos básicos minerais podem ser classificados: quanto à fonte de óleo cru e quanto ao tipo de processo de refino empregado na sua produção (convencional ou hidrefino). As principais diferenças entre os diversos tipos estão relacionadas às proporções entre os tipos de hidrocarbonetos (parafínicos, naftênicos e aromáticos), o índice de viscosidade (variação de viscosidade com a temperatura), o ponto de fluidez (temperatura mínima de escoamento) e os teores de enxofre.

Como mencionado anteriormente, os óleos básicos são produzidos em diferentes graus de viscosidade, que variam de acordo com a unidade produtora. O conjunto de óleos básicos de uma única fonte produtora recebe em inglês o nome *base oil slate* (ASTM D-445). Já os óleos lubrificantes comerciais (formulados) de aplicação industrial são classificados conforme sua viscosidade, de acordo com a norma ISO-3448, nos graus de viscosidade ISO-VG-XX, em que VG significa *viscosity grade* e “XX” é um número que representa a viscosidade a 40 °C do processo (ponto médio de uma faixa). Os óleos de processo e correção utilizados neste experimento, eram um ISO-VG-32 ou ISO-32 e um ISO-68 respectivamente.

No que se refere ao óleo cru de origem, os óleos básicos podem ser classificados como parafínicos ou naftênicos. Os óleos básicos parafínicos são geralmente mais estáveis, além de conter em sua composição hidrocarbonetos parafínicos em maior teor, o que leva a uma menor densidade e a uma menor variação de viscosidade com a temperatura (maior índice de viscosidade). Já os básicos naftênicos possuem baixíssimos teores de hidrocarbonetos parafínicos de cadeias lineares ou pouco ramificadas e, em decorrência, possuem pontos de fluidez muito baixos, mesmo sem passar por um processo de desparafinação. Por isso, são muito utilizados quando se necessita produzir lubrificantes para aplicações a baixas temperaturas, sem o uso de aditivos abaixadores de ponto de fluidez.

Óleos minerais aromáticos são produzidos como subprodutos da desaromatização das frações lubrificantes, mas não são considerados como óleos básicos lubrificantes por não apresentarem estabilidade termo-oxidativa aceitável. São utilizados na indústria de extensores e plastificantes, em sua maioria borrachas

escuras (ex: polibutadieno/BR, estireno butadieno/SBR e borracha natural/NR), além de serem utilizados também como componentes de tintas gráficas.

### 2.3 Propriedades físicas dos óleos lubrificantes

Propriedades físicas como a viscosidade e estabilidade termo-oxidativa são muito relevantes na análise de eficiência dos óleos lubrificantes em suas diferentes aplicações, desta forma se faz necessário uma análise mais aprofundada destas propriedades.

#### 2.3.1 Viscosidade

De acordo com STACHOWIAK e BATCHELOR (1993), a viscosidade é uma propriedade física que varia de acordo com a temperatura, a taxa de cisalhamento e a pressão a que estão submetidos os óleos lubrificantes. Viscosidade é a medida da resistência interna de um fluido (gás ou líquido) ao fluxo, ou seja, é a resistência oferecida pelo líquido quando uma camada se move em relação a uma camada subjacente, sendo que quanto maior a viscosidade, maior é a resistência ao movimento e menor é sua capacidade de escoar (fluir). O controle da viscosidade de óleos lubrificantes é muito importante, uma vez que a viscosidade define a resistência da película lubrificante, devendo ser realizado de acordo com a temperatura de trabalho.

##### Viscosidade dinâmica

Considerando-se duas superfícies separadas por um fluido com espessura  $h$ , tem-se que a força necessária para mover a superfície superior é proporcional à área de contato  $A$ , à velocidade de deslocamento da superfície móvel em relação à superfície fixa e inversamente proporcional à  $h$ . Cada fluido exibe uma constante de proporcionalidade particular,  $\eta$ , que pode variar com a tensão e tempo. A viscosidade dinâmica pode ser expressa na equação (2.2) em que  $\eta$  é a viscosidade dinâmica [Pa.s],  $\tau$  é a tensão de cisalhamento que atua no fluido [Pa] e  $u/h$  é taxa de cisalhamento, ou seja  $\eta$  é dado pela razão entre a tensão e a taxa de cisalhamento [ $s^{-1}$ ] (STACHOWIAK e BATCHELOR, 1993).

$$\eta = \frac{\tau}{(u/h)} \quad (2.2)$$

A unidade do Sistema Internacional (SI) para viscosidade dinâmica é  $\text{Ns/m}^2$  que é equivalente a Pa.s (Pascal-segundo). A unidade poise, usada em outros sistemas, equivale a  $10^{-1} \text{Ns/m}^2$  (ou  $10^{-1} \text{Pa.s}$ ).

### Viscosidade cinemática

A viscosidade cinemática pode ser definida como a razão entre a viscosidade dinâmica e a densidade do fluido, expressa pela equação (2.3) em que  $\nu$  é a viscosidade cinemática [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],  $\eta$  é a viscosidade dinâmica [Pa.s] e  $\rho$  é a massa específica do fluido [ $\text{kg/m}^3$ ] (STACHOWIAK e BATCHELOR, 1993).

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (2.3)$$

A unidade SI é  $\text{m}^2/\text{s}$  (metro quadrado por segundo). A unidade stoke (St) equivale a  $10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ .

No que se refere à medição da viscosidade, várias técnicas e equipamentos podem ser utilizadas, sendo que os viscosímetros rotacionais são muito utilizados. A técnica para medição de viscosidade com uso do viscosímetro rotacional baseia-se no princípio de que o fluido para o qual se deseja determinar a viscosidade é cisalhado entre duas superfícies (ASTM D2983), sendo uma estacionária e a outra rotacionada por um acionador externo até que o fluido preencha o espaço entre as duas superfícies. Esta medição é conduzida por meio da aplicação de um dado torque e da medição da variação na velocidade de rotação ou também a partir do estabelecimento de uma velocidade constante e medição da variação do torque. Este tipo de viscosímetro fornece a viscosidade dinâmica e é apropriado para medição de fluidos não newtonianos. Os tipos mais comuns são os viscosímetros de cilindro e cone rotativos (STACHOWIAK e BATCHELOR, 1993).

O viscosímetro de cilindro rotativo, também conhecido por Couette, é composto por dois cilindros rotativos concêntricos com um espaçamento anular completo por um fluido. O cilindro interno é estacionário e o externo rotaciona a velocidade constante, como pode ser demonstrado pelo diagrama esquemático apresentado na

Figura 2.5. Esta técnica consiste na medição da força necessária para que ocorra o cisalhamento do fluido entre os cilindros, sendo que a velocidade de rotação do cilindro externo pode ser alterada para que as variações na viscosidade do fluido possam ser analisadas. Cabe ressaltar que este tipo de equipamento é calibrado para medição de fluidos newtonianos, podendo ser também utilizado para medição de fluidos não newtonianos.

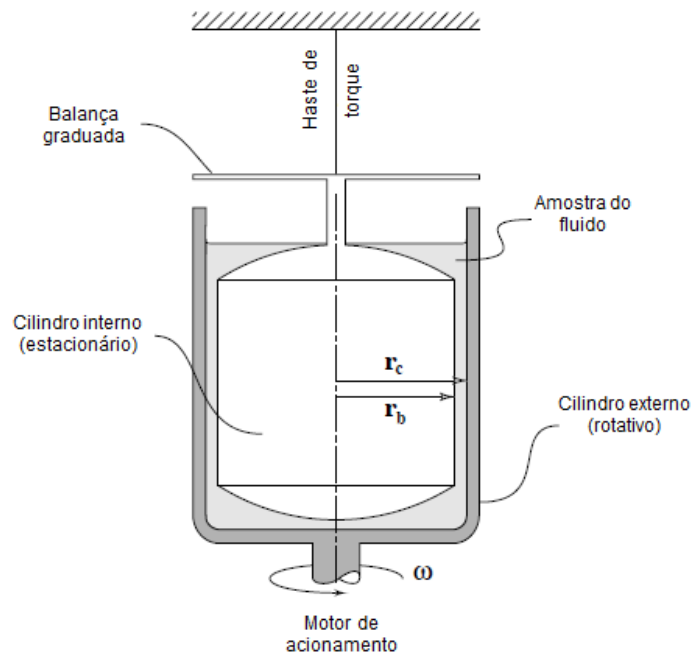


Figura 2.5 - Diagrama esquemático de um viscosímetro de cilindro rotativo (Adaptado de STACHOWIAK e BATCHELOR, 1993).

Por sua vez, o viscosímetro de cone rotativo consiste em uma superfície cônica e uma placa horizontal, sendo que qualquer uma destas superfícies pode ser rotacionada, conforme demonstrado na Figura 2.6. O espaço vazio entre o cone e a placa é preenchido com o fluido para o qual se deseja determinar a viscosidade e o ângulo do cone assegura uma taxa de cisalhamento constante no espaço vazio. Uma das maiores vantagens desta técnica é o volume reduzido de amostra necessário para a medição, além de possuir controle da temperatura durante a análise e poder ser utilizado para fluidos newtonianos e não-newtonianos.

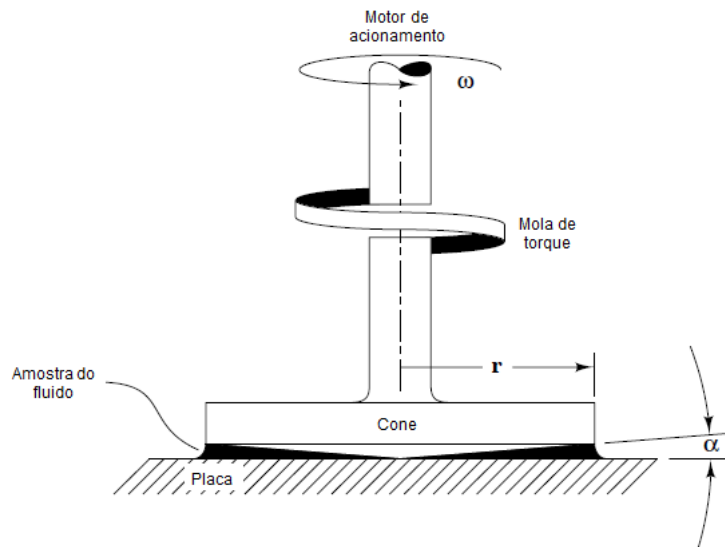


Figura 2.6 - Diagrama esquemático de um viscosímetro de cone rotativo (Adaptado de STACHOWIAK e BATCHELOR, 1993)

Todas as técnicas de medição de viscosidade dos fluidos podem ser adaptadas para estudar os efeitos da temperatura e da pressão na viscosidade. A medição da viscosidade, independentemente do método utilizado, deve ser efetuada com a temperatura controlada ou medida com precisão, para fins de compensação ou polarização. A viscosidade também depende da pressão, sendo que em algumas aplicações de óleos lubrificantes, é necessário conhecer a dependência viscosidade e pressão.

#### 2.4 Estimativa da viscosidade para mistura de óleos lubrificantes

De acordo com STACHOWIAK e BATCHELOR (1993), no âmbito industrial muitas vezes se faz necessário realizar a mistura de dois fluidos similares com diferentes viscosidades a fim de se obter uma mistura com uma determinada viscosidade. Dentro deste contexto, é necessário utilizar métodos que permitam estimar a viscosidade final da mistura.

Segundo GAO e LI (2012), a diluição de óleos com maior viscosidade é muito utilizada pela indústria petrolífera, desta forma a determinação da viscosidade final é de suma importância e a precisão do cálculo leva a menos retrabalho de ajuste. Atualmente, existem muitos modelos utilizados para esta determinação, tais como

fórmulas empíricas, semi-empíricas e tabelas de cálculo. De maneira geral, a maior parte destas fórmulas é derivada da análise de regressão de dados experimentais ao invés de mecanismos físicos.

A norma ASTM D7152-11 fornece uma das maneiras de se estimar a viscosidade final de uma mistura, a partir de um gráfico em que a abcissa representa a porcentagem de cada um dos fluidos e a ordenada indica a viscosidade de cada um dos fluidos a uma mesma temperatura. Conforme demonstrado na Figura 2.7, uma linha horizontal é desenhada entre os pontos e intercepta a linha horizontal que corresponde à viscosidade requerida. A linha vertical é então desenhada a partir do ponto que intercepta a abcissa, indicando a proporção necessária de cada um dos fluidos.

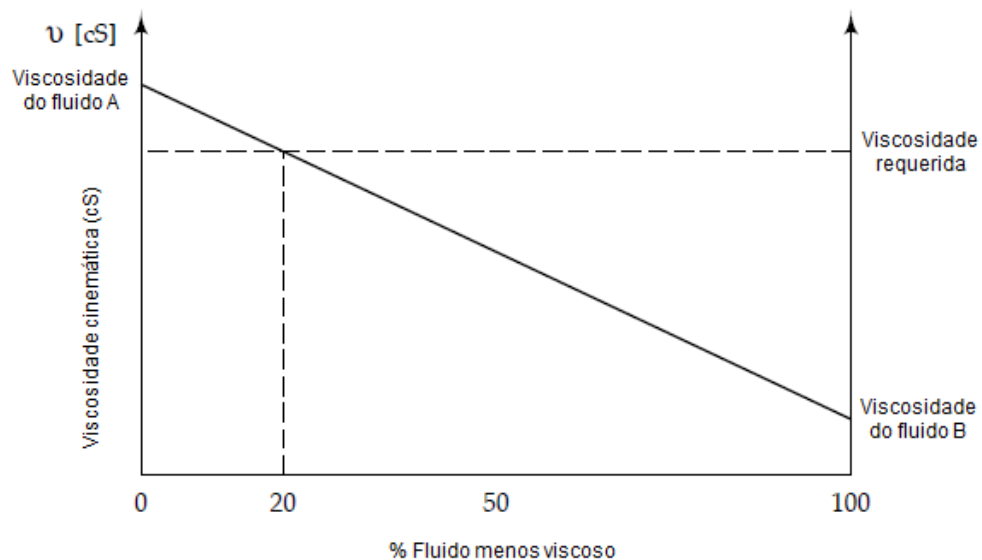


Figura 2.7 - Determinação da viscosidade final de uma mistura a partir da ASTM (Adaptado de STACHOWIAK e BATCHELOR, 1993)

De acordo com GAO e LI (2012), embora não haja um modelo universal para cálculo de viscosidade de uma mistura, o ideal é encontrar um modelo apropriado para o tipo de óleo. Existem alguns modelos utilizados mais frequentemente para determinação de viscosidade de uma mistura, tais como os modelos de Arrhenius, Walther, Kendall-Monroe e Bingham, cada qual com sua particularidade. A Tabela 2.1 mostra um comparativo entre os modelos de medição.

Tabela 2.1 - Modelos para estimativa de viscosidade de uma mistura

Modelos	Equação
Arrhenius	$\ln \mu = V_A \ln \mu_A + V_B \ln \mu_B$
Walther	$\ln \ln(\mu + C) = V_A \ln \ln(\mu_A + C) + V_B \ln \ln(\mu_B + C)$
Kendall-Monroe	$\mu^{1/n} = V_A \mu_A^{1/n} + V_B \mu_B^{1/n}$
Bingham	$\mu^{-1} = V_A \mu_A^{-1} + V_B \mu_B^{-1}$

Para as equações dos modelos apresentados na

Tabela 2.1, tem-se que  $V_A$  é a fração volumétrica do óleo com maior viscosidade,  $V_B$  é a fração volumétrica do óleo de menor viscosidade,  $\mu$  é a viscosidade estimada para a mistura,  $\mu_A$  é a viscosidade do óleo de maior viscosidade,  $\mu_B$  é a viscosidade do óleo que apresenta a menor viscosidade e  $C$  é uma constante.

De acordo com GAO e LI (2012), o modelo de Arrhenius é mais apropriado para altas razões de viscosidade, sendo utilizado para estimar a viscosidade de uma mistura de maneira satisfatória quando se tem um óleo muito pesado, tal como betume, misturado com um óleo de baixa viscosidade. Já o modelo de Walther não é apropriado para óleos que apresentam comportamento não-newtoniano. Por sua vez, o modelo Kendall–Monroe, é recomendado pelo Instituto Americano de Petróleo para estimativa da viscosidade da mistura entre hidrocarboneto puro a baixa pressão, desde que os componentes tenham massa molar e características semelhantes, o que faz com que este modelo seja muito limitado. Por fim, o modelo proposto por Bingham baseia-se em uma solução ideal e tem um erro maior na estimativa da viscosidade de uma mistura. Quando a viscosidade da mistura é menor do que 1000 mPa.s, o modelo de Arrhenius é muito indicado, por apresentar apenas uma leve diferença em relação aos valores experimentais, porém quando a viscosidade da mistura é maior do que 1000 mPa.s, os valores calculados são

menores de maneira geral, quando se trata de amostras de óleo cru, como o petróleo.

#### 2.4.1 Estabilidade termo-oxidativa de óleos lubrificantes

Segundo STACHOWIAK e BATCHELOR (1993), a estabilidade à oxidação é a resistência de um óleo lubrificante à degradação e rearranjo molecular a elevadas temperaturas em condições ambientais normais. A oxidação de óleos lubrificantes é um processo complexo intimamente relacionado com a vida útil do óleo. A taxa de oxidação ou a velocidade de degradação variam de acordo com o tipo de óleo lubrificante, sendo que os óleos minerais apresentam a resistência aceitável na maior parte de suas aplicações.

De acordo com WU *et al* (2013), a degradação por oxidação de óleos lubrificantes pode levar à formação de vários compostos contendo oxigênio, tais como ácidos, aldeídos, ésteres, cetonas, peróxidos e álcoois. A polimerização destes produtos primários do processo de oxidação gera moléculas de alta massa molar durante os últimos estágios de reação, resultando na formação de borra e verniz com um associado aumento da viscosidade.

Os mecanismos de oxidação para óleos de base mineral são conhecidos e já foram amplamente estudados. De acordo com os estudos de KOH e BUTT (1995), a oxidação de óleos lubrificantes de base mineral ocorre normalmente via mecanismo de iniciação por radicais livres, sendo que hidroperóxidos são os produtos primários da reação, convertidos em produtos mais estáveis com o avanço do processo oxidativo. Os produtos secundários estão relacionados a formação de borra e depósitos, o que mais uma vez justifica o aumento da viscosidade de óleos lubrificantes ao longo de sua vida útil.

Os processos de oxidação podem ser controlados por aditivos, que possuem dois tipos de atuação: captura de radicais livres e decomposição de peróxidos, sendo que ambos quebram a reação em cadeia. Além do aumento da viscosidade já citado, os produtos da reação podem acarretar em um aumento do efeito corrosivo do óleo, além de provocar o acúmulo de depósitos (borras e vernizes) em superfícies. Estes fatores interferem negativamente não só no desempenho, mas



também na vida útil de instalações e equipamentos, aumentando conseqüentemente os custos de operação e manutenção (STACHOWIAK e BATCHELOR, 1993).

No que se refere à estabilidade térmica, tem-se que os óleos lubrificantes irão sofrer degradação com o aumento de temperatura, mesmo na ausência de oxigênio. A estabilidade térmica está relacionada à resistência dos óleos lubrificantes a degradação ou rearranjo molecular na ausência de oxigênio e pode ser melhorada a partir de processos de refinamento somente. Para óleos minerais, com uma significativa porcentagem de hidrocarbonetos com ligações simples entre carbonos, o limite de estabilidade térmica se dá a temperaturas próximas a 350°C, sendo maior do que quando comparado a óleos sintéticos. Cabe ressaltar que, de maneira geral, a degradação térmica ocorre a temperatura bem maiores do que processos de oxidação (STACHOWIAK e BATCHELOR, 1993).

De acordo com ARAÚJO *et al* (1996), uma das maneiras utilizadas para avaliação de processos termo-oxidativos em óleos lubrificantes é o monitoramento das mudanças nas concentrações dos componentes dos óleos básicos ao longo do processo de oxidação, variando-se a temperatura e adicionando-se contaminantes. No estudo em questão, a oxidação de um óleo lubrificante contaminado com 50 ppm de ferro e de cobre, adicionados na forma de naftenatos para atuar como catalisadores da oxidação, foi avaliada, sendo que mesmo sob estas condições extremas, a 90 °C as variações de características, entre elas a viscosidade, mostraram-se muito leves.

## **2.5 Técnicas para monitoramento da condição de óleos lubrificantes**

Segundo VOORT *et al* (2011), óleos lubrificantes passam por um complexo processo de alteração em sua estrutura química quando em operação como resultado de ação térmica, física e oxidativa sofrida ao longo de sua vida útil. O monitoramento da condição do óleo pode ser estabelecido para avaliar as mudanças nas características do óleo lubrificante em relação aos seus valores originais e sua habilidade em continuar a exercer a função à qual foi designado. Este monitoramento tem seu foco em fatores que afetam o desempenho e a confiabilidade do equipamento ou do processo e permite tomar decisões, como a

troca do óleo lubrificante ou a utilização de recursos aditivos para minimizar os impactos sofridos pelo óleo ao longo do tempo. A maior vantagem de se estabelecer o monitoramento é a possibilidade de otimização do uso do lubrificante, evitando trocas desnecessárias, além de evitar falhas prematuras do equipamento ou processo, principalmente em aplicações industriais de alto custo.

De acordo com SOLEIMANIA *et al* (2014), o monitoramento da condição de óleos lubrificantes vem sendo realizado a partir de testes em laboratório, que muitas vezes são dispendiosos, com amostras coletadas regularmente, para análises que fornecem resultados sobre a condições do óleo e permitem a manutenção do sistema.

A técnica do espectrofotômetro de infravermelho (FTIR) é amplamente utilizada para controle da condição de óleos lubrificantes. Todas as moléculas orgânicas possuem a capacidade de absorver energia no campo infravermelho em comprimentos de onda específicos que combinam com suas frequências de vibração molecular, desta forma, todos os componentes puros possuem espectros infravermelho únicos, como se fossem impressões digitais e que permitem a identificação destes componentes. De maneira análoga, misturas bem definidas de compostos, tais como alguns óleos lubrificantes, também possuem um espectro característico que representa a sobreposição das contribuições espectrais de cada componente individual que compõe a mistura. Grupos funcionais específicos, tais como CH<sub>3</sub>, CH<sub>2</sub>, OH, COOH e NH<sub>2</sub>, absorvem energia em regiões de comprimentos de onda bem definidos, permitindo que estes componentes sejam caracterizados de maneira fácil e precisa em uma amostra (VOORT *et al*, 2011).

Ainda sobre a técnica FTIR, VOORT *et al* (2011) afirma que esta apresenta muitas vantagens por ser uma maneira relativamente simples de avaliação de parâmetros qualitativos em óleos lubrificantes. Além disso, como a maioria dos constituintes e contaminantes possui uma razoável distinção no infravermelho, esta análise fornece muitas informações sobre a condição básica do óleo a partir da comparação com o óleo novo ou outro óleo de referência. Além da abordagem qualitativa, esta técnica também tem sido aplicada como uma ferramenta de análise quantitativa na determinação de conteúdo ácido e básico, além do conteúdo de umidade presente no óleo.

Outra técnica adotada para controle da condição de óleos lubrificantes é a espectrometria molecular na região ultravioleta-visível (UV-Vis), que vem sendo usada há mais de 50 anos na quantificação de espécies moleculares orgânicas e inorgânicas e também em amostras bioquímicas em diferentes tipos de materiais (FREITAS, 2006). De acordo com SKOOG (2002), esta técnica fundamenta-se nas medidas de absorção molecular em substâncias que são estimuladas a sofrer transições eletrônicas devido à absorção de energia na região UV-Vis. Para isso, utiliza-se um feixe de luz branca incidente sobre uma amostra (espécie molecular) que absorve luz e a radiação resultante emergente será detectável pela cor complementar da radiação absorvida.

Segundo NETO (2008), a espectroscopia molecular na região UV-VIS destaca-se perante outras técnicas espectrométricas, por apresentar uma instrumentação de baixo custo, facilidade de operação, ampla aplicabilidade em diversas áreas do conhecimento para identificação ou quantificação de compostos químicos, alto grau de exatidão e aceitação com erros relativos estão na faixa de 1 % a 5 % em termos de concentração e alta relação sinal-ruído tendo seus limites de detecção na faixa de  $10^{-4}$  mol L<sup>-1</sup> a  $10^{-5}$  mol L<sup>-1</sup>, podendo chegar a  $10^{-7}$  mol L<sup>-1</sup>.

Uma terceira técnica é a espectrometria de massa, muito utilizada para obtenção de informações tanto qualitativas, quanto quantitativas sobre materiais. De acordo com AEBERSOLD *et al.* (2003), a espectrometria de massa é uma técnica utilizada no estudo das massas de átomos, moléculas ou fragmentos de moléculas, baseando-se em propriedades físicas do analito de forma a determinar a razão entre a massa e a carga (m/z) de espécies ionizadas em fase gasosa.

A análise por espectrometria de massa consiste na geração de íons com base em compostos (orgânicos ou inorgânicos) por meio de um método de ionização apropriado. Em seguida, os íons são separados com base na sua razão massa-carga (m/z) em um analisador de massas e detectados qualitativamente e ou quantitativamente por meio de um detector, o qual “conta” os íons. A magnitude do sinal elétrico em função da razão m/z é convertida por um processador de dados, o qual gera o espectro de massas correspondente (GROSS, 2004).

De acordo com CHIARADIA *et al.* (2008), a espectrometria de massa é uma das técnicas analíticas mais utilizadas e de melhor desempenho, podendo ser

combinada a diferentes sistemas de detecção. Quando acoplado a um cromatógrafo, o espectrômetro de massas combina as vantagens da cromatografia, como a alta seletividade e eficiência de separação, com as vantagens da espectrometria de massas, que se referem a obtenção de informação estrutural, massa molar e aumento adicional da seletividade. Quando o acoplamento ocorre, é necessário que as características de cada instrumento não sejam afetadas por sua conexão, não devendo ocorrer modificações químicas não controladas do analito e perda de amostra durante a sua passagem do cromatógrafo para o espectrômetro de massas. As técnicas cromatográficas mais comumente acopladas à espectrometria de massas são a cromatografia gasosa e a cromatografia líquida de alta eficiência.

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 Descrição

A metodologia do trabalho foi desenvolvida com base nos resultados obtidos por COSEGLIO (2013), que mostrou que a redução da viscosidade do óleo e a perda de partículas abrasivas para o sistema são apontadas como os fatores que mais contribuem para a redução da eficiência na remoção de material no processo de hidroerosão. Baseou-se também na teoria do momento de equilíbrio ( $\lambda$ ) da partícula de HUMPHREY (1990), em que a redução na viscosidade leva a um aumento do momento de equilíbrio ( $\lambda$ ) e conseqüentemente a um menor acoplamento da partícula com o fluido e, por conseguinte, a uma menor remoção de material, que se reflete diretamente na eficiência do processo.

Partindo-se destas premissas, buscou-se desenvolver um procedimento de ajuste da viscosidade do fluido erosivo e de aplicação deste procedimento no processo produtivo. O processo foi monitorado para avaliar a efetividade do ajuste da viscosidade e, em paralelo a isso, as causas da redução da viscosidade do fluido erosivo foram investigadas.

### 3.2 Equipamento de hidroerosão

O monitoramento do processo de hidroerosão para avaliação do efeito do ajuste da viscosidade do fluido erosivo foi realizado em um equipamento para usinagem por hidroerosão de propriedade da planta industrial da Robert Bosch em Curitiba. Este equipamento é considerado como *core technology* da Robert Bosch por ser específico para usinagem de canais internos dos bicos injetores fabricados pela empresa.

Os bicos injetores são direcionados ao processo de hidroerosão após passarem por uma etapa de usinagem por eletroerosão, que tem como objetivo a furação do bico injetor para a formação dos canais de injeção nos bicos injetores. Devido às características do processo e do eletrodo utilizado, os furos de injeção processados por eletroerosão possuem formato cônico e superfície rugosa. Os furos de injeção usinados, por sua vez, possuem diâmetro e fluxo volumétrico

determinados de acordo com a especificação de engenharia e de sua aplicação. Após processo de eletroerosão, os bicos injetores são colocados em suportes e encaminhados manualmente para o equipamento de hidroerosão. Os suportes são então colocados na entrada do equipamento de hidroerosão, que possui alimentação automatizada por robôs com pinças para o transporte das peças dentro do equipamento.

Este equipamento pode ser considerado como uma máquina retificadora por hidroerosão, automática e dotada de comando numérico computadorizado (CNC), mesa rotativa com doze posições para acomodação dos bicos injetores, três bombas de alta pressão (150 bar) e sistema pneumático de carga e descarga. O equipamento de hidroerosão possui quatro estações automáticas com funções definidas conforme quadro explicativo da Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Identificação das estações do equipamento de hidroerosão

<b>Nº da Estação</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Identificação da estação</b>	Medição do fluxo volumétrico	Usinagem por Hidroerosão	Enxágue	Medição do fluxo volumétrico
<b>Função da estação</b>	Medir o fluxo volumétrico no interior do bico injetor	Arredondar o diâmetro interno dos canais de injeção do bico injetor	Lavar as peças para retirada do fluido erosivo que se acumula no interior do bico injetor	Medir o fluxo volumétrico no interior do bico injetor
<b>Tipo de fluido utilizado</b>	Óleo de exame	Fluido erosivo	Óleo de exame reaproveitado do tanque 1 após final de sua vida útil	Óleo de exame
<b>Identificação do tanque</b>	Tanque 1	Tanque 2	Tanque 3	Tanque 1

Os bicos injetores são transferidos automaticamente de uma estação para outra após a finalização de cada etapa do processo. As diferentes estações e suas interligações podem ser visualizadas no diagrama da Figura 3.1.

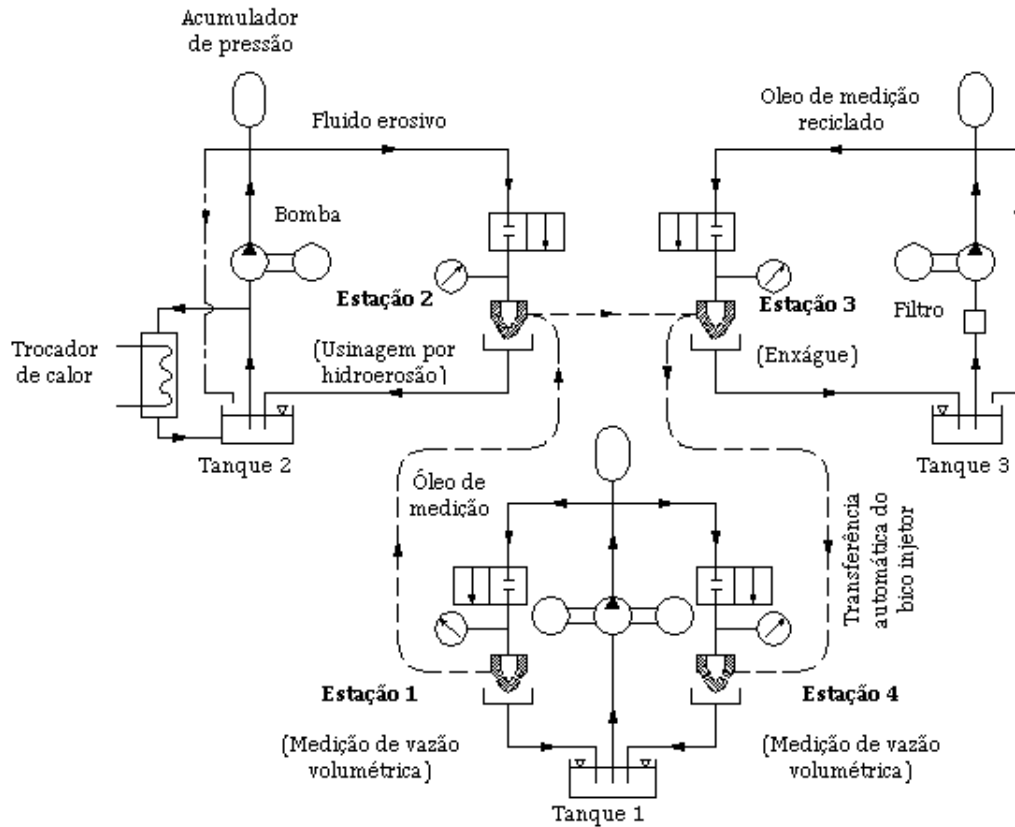


Figura 3.1 - Diagrama das estações do processo de usinagem por hidroerosão (COSEGLIO, 2013)

A primeira estação do equipamento de hidroerosão tem a função de medir o fluxo volumétrico no interior do bico injetor após o processo de eletroerosão, sendo de extrema importância para o processo de hidroerosão, uma vez que este valor serve como referência para que o equipamento automaticamente defina se a peça está dentro da tolerância de fluxo volumétrico especificada para alimentar este processo. O fluido utilizado nesta etapa é um óleo de exame contido no tanque 1.

A segunda estação é responsável pelo processo de usinagem por hidroerosão, sendo que nesta etapa o fluido erosivo é bombeado em circuito fechado passando pelo interior do bico injetor e dos canais de injeção a uma pressão de 100 bar e temperatura de 25 °C até que o fluxo volumétrico atinja o valor especificado, com tempo de ciclo médio (tempo para atingir a vazão desejada no interior do bico injetor)

de 15 s, sendo então transferido automaticamente para a terceira estação. O fluido erosivo utilizado nesta etapa de processo está contido no tanque 2.

Na terceira estação é realizada uma etapa de lavagem para remoção do fluido erosivo restante no interior do bico injetor, utilizando-se óleo de exame reaproveitado e que fica contido no tanque 3. Esta lavagem é importante para que não haja contaminação prematura do óleo de exame que fica no tanque 1.

Por fim, na quarta última estação é realizada uma nova medição para avaliar se o fluxo volumétrico especificado para a peça após esta etapa foi alcançado após o processo de hidroerosão. Caso o fluxo volumétrico não tenha sido alcançado, a peça retorna ao processo para retrabalho.

### 3.3 Fluidos e partículas envolvidos no processo atual

Conforme já exposto na seção 3.2, o fluido de exame contido no Tanque 1 do equipamento de hidroerosão é utilizado para as medições de fluxo volumétrico antes e após o processo de hidroerosão, nas estações 1 e 4 respectivamente.

O óleo mineral utilizado para o exame do fluxo volumétrico apresenta características físico-químicas conforme mostra a Tabela 3.2 e está na mesma faixa de viscosidade do óleo diesel (2 a 4 cSt).

Tabela 3.2 - Propriedades típicas do óleo de exame do fluxo volumétrico (Fonte: Zeller Gmellin, 2013)

Propriedade	Unidade	Valor
Ponto de fulgor	°C	> 90
Densidade a 15°C	kg/m <sup>3</sup>	820
Viscosidade cinemática a 40°C	mm <sup>2</sup> /s	2,6

O controle da viscosidade do óleo de exame é realizado a cada 3 dias, sendo que a viscosidade não pode ser inferior a 1,7 mm<sup>2</sup>/s, por ser o valor limite estipulado pelo departamento de Engenharia da Robert Bosch para que não haja interferência na medição do fluxo volumétrico no interior do bico injetor. A vida útil média do óleo



de exame é de 15 dias, ocorrendo então seu encaminhamento ao tanque 3 para ser reutilizado como fluido para enxágue, já que o óleo de enxágue não possui nenhuma especificação quanto à viscosidade ou qualquer outra característica de controle.

Por sua vez, o fluido erosivo é composto por uma mistura de óleo mineral e partículas abrasivas de carbeto de boro ( $B_4C$ ). O volume de óleo utilizado no tanque 2 do equipamento de hidroerosão é de 65 l e a concentração de partículas depende do tipo de bico a ser usinado e do fluxo volumétrico especificado, ou seja, a taxa de remoção de material que se deseja obter.

O óleo do fluido erosivo caracteriza-se como óleo mineral leve, com alta estabilidade termo-oxidativa e de grau de viscosidade ISO-32. É considerado como meio dispersante para materiais abrasivos para arredondamento hidráulico de componentes com geometrias complexas. Algumas de suas propriedades são apresentadas na Tabela 3.3

Tabela 3.3 - Propriedades típicas do óleo de processo (Fonte: Zeller Gmellin, 2013)

Propriedade	Unidade	Valor
Ponto de fulgor	°C	> 190
Densidade a 15°C	kg/m <sup>3</sup>	870
Viscosidade cinemática a 40°C	mm <sup>2</sup> /s	32

O material das partículas do fluido erosivo é o carbeto de boro ( $B_4C$ ), um material cerâmico com elevada dureza e alto ponto de fusão, além de possuir estabilidade química e alta dureza. Há uma especificação de distribuição granulométrica destas partículas, apresentada na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Parâmetros de distribuição de tamanho de partículas de carbeto de boro,  $d_{10}$ ,  $d_{50}$  e  $d_{90}$ , do abrasivo novo (Apêndice A)

Diâmetro $d_p$ ( $\mu m$ )	
$d_{10}$	2,5
$d_{50}$	6,8
$d_{90}$	10,7

### 3.4 Ajuste da viscosidade do fluido erosivo

Ao analisar a eficiência do processo de hidroerosão é fundamental que se tenham dados sobre o comportamento do processo e do fluido erosivo ao longo do tempo. Para tal, faz-se necessário realizar um monitoramento do processo a partir dos dados de produção, tais como tempo de ciclo e tipo de bico injetor produzido. Além disso, análises das amostras do fluido erosivo servem para obtenção de dados sobre as propriedades físico-químicas do óleo e também para análise de tamanho das partículas abrasivas.

O estudo de COSEGLIO (2013) utilizando o monitoramento do processo de hidroerosão sem renovação de partículas e sem ajuste da viscosidade mostra um comportamento de redução da viscosidade do fluido erosivo em aproximadamente 50 % durante um período de 100 horas de trabalho, conforme Figura 3.2.

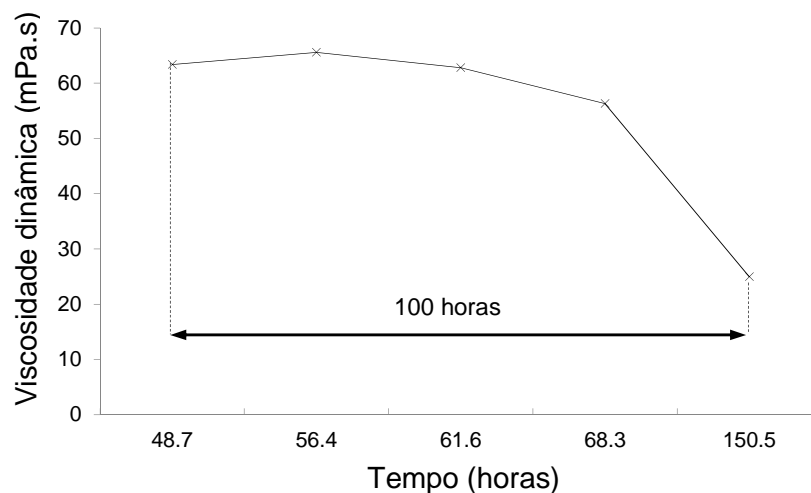


Figura 3.2 - Comportamento da viscosidade do fluido erosivo no processo padrão (Adaptado de COSEGLIO, 2013)

Com base nestes resultados, uma nova etapa de monitoramento foi realizada juntamente com a utilização de um óleo de maior viscosidade para corrigir periodicamente a viscosidade do fluido erosivo, o mantendo na condição inicial de trabalho, com viscosidade cinemática de 32 mm<sup>2</sup>/s a 40 °C, que corresponde a uma viscosidade dinâmica de 58,5 mPa.s a 25 °C.

O óleo mineral utilizado para o ajuste da viscosidade do fluido erosivo do processo de hidroerosão, produzido pelo mesmo fornecedor do óleo de usinagem atual, apresenta as propriedades físico-químicas apresentadas na Tabela 3.5. A escolha do óleo de correção foi realizada de modo a minimizar mudanças no processo atual adotado pela Empresa, definindo-se então, um óleo com as mesmas propriedades químicas, porém com maior viscosidade.

Tabela 3.5 - Propriedades do óleo de correção (Fonte: Zeller Gmellin, 2014)

Propriedade	Unidade	Valor
Ponto de fulgor	°C	> 190
Densidade a 15°C	kg/m <sup>3</sup>	880
Viscosidade cinemática a 40°C	mm <sup>2</sup> /s	68

### 3.4.1 Sistemática de ajuste da viscosidade do fluido erosivo

A sistemática utilizada para ajuste da viscosidade e avaliação de sua eficiência é apresentada na Tabela 3.6. Cada etapa apresentada será descrita em detalhe na sequência.

Tabela 3.6 - Etapas do procedimento de correção da viscosidade do fluido erosivo

Etapa	Descrição	Local de ocorrência
1	Renovação de todos os fluidos do equipamento de hidroerosão para início do monitoramento	Equipamento de Hidroerosão
2	Coleta de amostra do fluido erosivo durante o monitoramento	Tanque 2 do Equipamento de Hidroerosão
3	Preparação da amostra e análises para caracterização do fluido erosivo	Laboratório químico da Robert Bosch / UTFPR
4	Cálculo do volume do óleo de ajuste para correção da viscosidade	-
5	Ajuste da viscosidade do fluido erosivo	Tanque 2 do Equipamento de Hidroerosão
6	Nova coleta e análises para verificar a efetividade da correção da viscosidade	-
7	Coleta dos dados da produção para análise da eficiência do processo	-

### Etapa 1

Para garantir a confiabilidade do monitoramento, todos os fluidos existentes no equipamento de hidroerosão foram removidos e substituídos por fluidos novos. Em especial no tanque 2, onde fica o fluido erosivo, foi realizada uma etapa adicional de lavagem com óleo de processo novo (ISO-32), que circulou pelo sistema por 10 minutos para garantir que não houvesse acúmulo de partículas abrasivas no equipamento antes do recebimento de um fluido erosivo novo.

### Etapa 2

O início do monitoramento representado por  $i=1$  na Tabela 3.7 foi definido logo após a limpeza do tanque da estação de usinagem por hidroerosão (Figura 3.1, p.41) e renovação completa do fluido erosivo, representando o início da produção. Para cada intervalo  $i$ , uma amostra foi coletada para análise, sendo que o monitoramento completo foi realizado durante aproximadamente 160 horas, com coleta de 17 amostras ao todo.

Para garantir a confiabilidade da medição de viscosidade, as amostras foram coletadas imediatamente antes da adição do óleo para correção e 10 minutos em média após sua adição, tempo necessário para homogeneização da mistura. Após cada coleta, as amostras foram encaminhadas ao laboratório químico para a etapa de preparação da amostra. O intervalo de tempo entre a coleta e a preparação de amostra foi em média de 30 min.

Tabela 3.7 - Dados gerais do monitoramento

Intervalo	Amostra	Tempo acumulado (h)
i=1	A1	2,78
i=2	A2	21,02
i=3	A3	26,94
i=4	A4	27,07
i=5	A5	54,65
i=6	A6	57,13
i=7	A7	67,67
i=8	A8	67,67
i=9	A9	75,55
i=10	A10	86,17
i=11	A11	90,50
i=12	A12	101,18
i=13	A13	101,28
i=14	A14	119,68
i=15	A15	143,10
i=16	A16	159,83
i=17	A17	160,00

### Etapa 3

A preparação das amostras para medição de viscosidade e demais análises se deu a partir da filtragem do fluido para remoção das partículas abrasivas, realizada no laboratório químico da planta industrial da Robert Bosch em Curitiba, utilizando-se uma membrana de 1  $\mu\text{m}$  para filtragem por sucção do fluido erosivo. Esta etapa se faz necessária para que as partículas abrasivas não interfiram na medição da viscosidade e também para utilização do abrasivo filtrado nas análises granulométricas. A preparação da amostra leva cerca de 5 horas devido ao baixo tamanho dos poros da membrana. Assim sendo, o intervalo de tempo entre a retirada da amostra após preparação e sua análise foi de 5 horas.

Ao todo, foram realizadas 3 diferentes análises com as amostras de fluido erosivo, conforme apresentado na

Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Dados gerais sobre as análises realizadas

Análise	Material utilizado para análise	Quantidade	Amostras analisadas
Concentração volumétrica de partículas sólidas	Fluido erosivo	~ 30 ml	A1, A4, A8, A13, A17
Viscosidade	Óleo	~ 400 ml	A1 até A17
Granulometria	Partículas	~ 10g	A1 e A7

A análise da concentração volumétrica de partículas do fluido erosivo foi obtida a partir da medição das amostras do fluido erosivo utilizando uma centrífuga de bancada da marca *Heraeus*, modelo *Megafuge 1.0*.

A concentração volumétrica de partículas,  $\phi_p$ , definida em termos do volume total de sólidos,  $V_s$ , e o volume total do fluido erosivo,  $V_T$ , é dada pela equação (3.1):

$$\phi_p = \frac{V_s}{V_T} \quad (3.1)$$

Para a medição foram utilizadas amostras de 100 ml inseridas em provetas de vidro graduadas que são fixadas no interior do equipamento. As amostras foram centrifugadas por 20 min a 2700 rpm, em duas etapas com reposicionamento das amostras no interior da centrífuga entre estas etapas (posição oposta a 180°) para garantir a separação entre as fases. Os valores da concentração em volume de partículas foram então obtidos por meio da leitura visual da altura da fase sólida decantada após a centrifugação através da proveta graduada.

As análises da concentração de partículas nos instantes  $i=1$ ,  $i=4$ ,  $i=8$ ,  $i=13$  e  $i=17$  coincidem com o início do monitoramento e também com os momentos após as correções de viscosidade para avaliar a influência das correções na concentração de partículas.

Por sua vez, as medições de viscosidade foram realizadas no Laboratório de Ciências Térmicas (CERNN) da UTFPR, utilizando-se um viscosímetro rotativo Brookfield de cilindros coaxiais do tipo taxa controlada e sensor tipo Searle. As amostras avaliadas foram mantidas a 25 °C, temperatura de operação do processo de usinagem por hidroerosão. Para as medições, aproximadamente 16 ml de óleo de cada amostra foram adicionadas no cilindro externo do viscosímetro, sendo então montado no equipamento juntamente com o cilindro interno. A camisa de circulação de água existente ao redor do cilindro externo tem a função de regulação da temperatura da amostra de óleo, que foi mantido em repouso por 10 min antes dos ensaios para estabilização da temperatura. Os resultados de viscosidade do presente estudo estão expressos em viscosidade dinâmica a 25°C.

Por fim, as análises granulométricas de distribuição de tamanho das partículas abrasivas foram realizadas utilizando o método de difração a laser. O equipamento utilizado foi o granulômetro a laser da marca Microtrac, modelo S3500, com limites de detecção entre 0,02  $\mu\text{m}$  e 2800  $\mu\text{m}$ . Os ensaios foram realizados na UTFPR Campus Curitiba. As amostras A1 e A7 foram selecionadas por representarem as amostras com o maior e o menor resultado da medição de viscosidade, respectivamente.

As amostras foram posicionadas no suporte do equipamento e dispersas mecanicamente com uso de ultrassom, utilizando álcool isopropílico como meio dispersante. O método de difração a laser utiliza a teoria do espalhamento Mie de luz para o cálculo do tamanho das partículas. O feixe de luz incidente sobre as partículas dispersas forma padrões de difração que são utilizados no modelo matemático para determinação do tamanho, considerando o diâmetro equivalente de uma partícula esférica. Para cada amostra foram obtidos os histogramas com a distribuição de frequência de tamanho e os parâmetros estatísticos  $d_{10}$ ,  $d_{50}$  e  $d_{90}$ , que representam os diâmetros das partículas para os quais 10 %, 50 % e 90 % em

volume de partículas, respectivamente, são menores do que os respectivos diâmetros.

Os resultados das análises granulométricas, juntamente com os dados de viscosidade das amostras serviram de base para a avaliação do acoplamento das partículas. A equação utilizada já apresentada (equação 2.1, p. 23), serviu de base para o cálculo do acoplamento. O tamanho das partículas ( $d_p$ ) foi alterado como variável na fórmula até que fossem atingidos os valores limite de acoplamento. Assim como já utilizado por COSEGLIO (2013), os valores limite de acoplamento foram definidos como  $\lambda < 0,5$  para alto acoplamento,  $0,5 \leq \lambda \leq 1$  para acoplamento intermediário e  $\lambda > 1$  para baixo acoplamento.

#### Etapa 4

O ajuste da viscosidade foi realizado a partir da determinação da quantidade ótima do óleo de maior viscosidade a ser adicionada no fluido a fim de se obter a viscosidade nominal do óleo (ISO-32), conforme condição inicial de trabalho.

O volume de óleo de correção necessário para o ajuste foi obtido a partir da equação (3.2) baseada na equação de Arrhenius (Tabela 2.1, p.33) , em que  $V_f$  representa o volume final do tanque 2 após correção,  $\mu_f$ , a viscosidade objetivada,  $V_i$  representa o volume do tanque 2 antes da correção,  $\mu_i$  é a viscosidade do fluido erosivo antes da correção,  $\mu_A$  é a viscosidade nominal do óleo de processo e  $\mu_B$  é a viscosidade nominal do óleo de correção.

$$V_{\text{correção}} = \frac{(V_f * \log \mu_f - V_i * \log \mu_i) - ((V_f - V_i) * \log \mu_A)}{(\log \mu_B - \log \mu_A)} \quad (3.2)$$

A partir dos resultados da equação (3.2), a viscosidade do fluido erosivo foi corrigida, sempre mantendo o volume do tanque constante em 65 l ( $V_f$ ), conforme especificado pelo fabricante do equipamento.



Para tal, fez-se necessário, por vezes, retirar parte do fluido erosivo presente no tanque, utilizando-se a equação (3.3), em que  $V_f$  representa o Volume final do tanque 2 após correção,  $V_i$  representa o volume do tanque 2 antes da correção e  $V_{correção}$  é obtido a partir da equação (3.2).

$$V_{descarte} = (V_f - V_i - V_{correção}) \quad (3.3)$$

### **Etapa 5**

A partir do resultado do cálculo para determinação do volume de óleo necessário para correção da viscosidade, o óleo de correção foi então adicionado ao tanque 2 de fluido erosivo, respeitando a capacidade do tanque que é de 65 l.

Durante as 160 horas ocorreram 4 etapas de correção da viscosidade, entre os intervalos  $i=3$  e  $i=4$ ,  $i=7$  e  $i=8$ ,  $i=12$  e  $i=13$  e  $i=16$  e  $i=17$ . A definição destes intervalos se deu por meio da avaliação dos resultados de COSEGLIO (2013), que mostram a redução da viscosidade do fluido erosivo ocorre após cerca de 50 horas de trabalho. A opção por fazer correções em intervalos menores do que 50 horas devem-se à rotina de operação do equipamento de hidroerosão e à intenção de realizar as correções em dias específicos, a fim de coincidir com paradas planejadas do equipamento de hidroerosão e, assim, minimizar os distúrbios na produtividade do processo produtivo.

### **Etapa 6**

Após adição do óleo de correção, fazia-se necessário aguardar até que o óleo de correção pudesse homogeneizar-se com o fluido erosivo então presente no tanque, o que durava em média 15 min. Após este período, uma nova amostra foi coletada para repetição das análises de viscosidade e concentração volumétrica de sólidos.

### **Etapa 7**

Após 160 horas de monitoramento, foram extraídos do *software* do equipamento de hidroerosão os dados referentes ao período monitorado, tais como

identificação dos bicos injetores produzidos no período, tempo de ciclo de usinagem, número de peças produzidas.

O efeito da perda de eficiência na remoção de material no processo de hidroerosão pode ser observado a partir do aumento no tempo de usinagem, ou seja, o tempo necessário para que o fluxo volumétrico especificado seja atingido. Variáveis como a quantidade de peças produzidas e o fluxo volumétrico na peça, antes e após o processo de hidroerosão, também devem ser consideradas na análise da eficiência do processo.

A Equação (3.4) definida por COSEGLIO (2013) pode ser usada para definir a taxa média de arredondamento do processo de hidroerosão, em que  $N_i$  representa a quantidade de bicos injetores produzidos no lote;  $Q_{1(j)}$  corresponde ao fluxo medido imediatamente antes do início do processo de usinagem por hidroerosão do bico injetor  $j$  e  $Q_{2(j)}$  representa o fluxo atingido após o processamento.

$$\bar{E}_{h(i)} = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} \left( \frac{Q_{2(j)} - Q_{1(j)}}{Q_{1(j)}} \right) 100 \quad (3.4)$$

Esta fórmula serve como um indicador da eficiência do processo e também para julgar se as técnicas de estabilização da eficiência de remoção de material no processo, tais como o ajuste da viscosidade ao longo do período de vida útil do fluido erosivo são eficientes ou não.

A viscosidade do fluido erosivo e do óleo de correção para ajuste ao longo do tempo foi analisada durante o período monitorado a fim de se obter uma relação entre estas variáveis e a eficiência de remoção de material no processo de hidroerosão ao longo da vida útil do fluido erosivo.

Durante o período de monitoramento, apenas um tipo específico de bico injetor foi avaliado quanto à eficiência de remoção de material, sendo o mesmo utilizado para a avaliação realizada no estudo de COSEGLIO (2013). Desta forma as características de diâmetro, comprimento e quantidade de furos de injeção podem ser consideradas constantes. As demais condições do processo, tais como pressão e temperatura foram mantidas constantes. Após a conclusão do monitoramento, os

dados necessários para análise da eficiência do processo – tempos de arredondamento e fluxo volumétrico no bico injetor antes e após o processo de hidroerosão – foram extraídos dos dados de produção para conclusão das análises.

### **3.5 Avaliação da causa raiz para a redução da viscosidade do fluido erosivo**

Tendo a viscosidade como um importante parâmetro para garantir a eficiência do processo de hidroerosão, faz-se necessário avaliar os motivos que ocasionam este efeito.

#### **3.5.1 Interações entre as estações do equipamento de hidroerosão**

O esquema mostrado na Figura 3.3 apresenta o sentido de transporte de fluidos de uma estação para outra. A estação 1 é responsável pela medição do fluxo volumétrico antes do processo de hidroerosão, utilizando-se para esta medição um óleo de baixa viscosidade específico para esta finalidade. Após a medição e ainda na estação 1, existe uma etapa de sucção do fluido restante na peça, para minimizar o arraste para a estação 2. Este fluido resultante da sucção é retornado para o tanque do óleo de exame (tanque 1), conforme diagrama do equipamento de hidroerosão já apresentado na Figura 3.1 (p. 41).

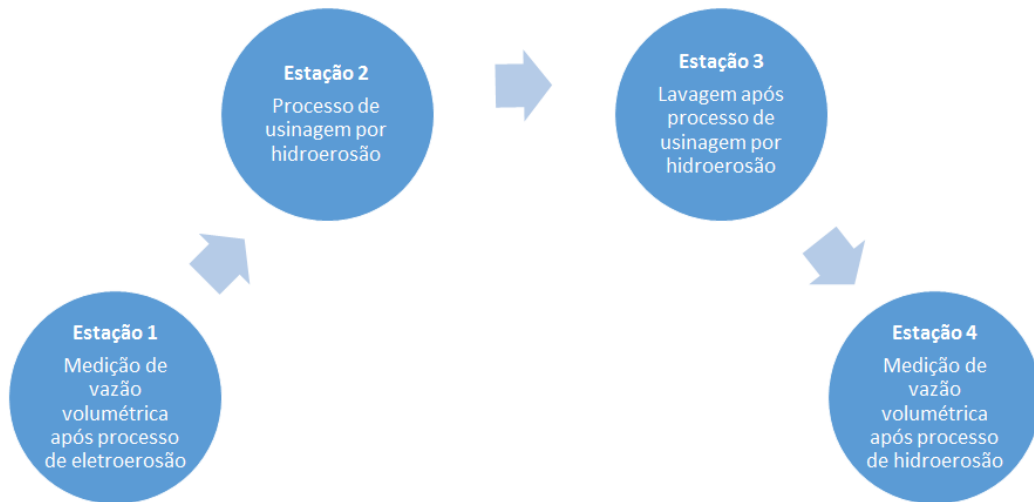


Figura 3.3 - Esquema do sentido de transporte dos fluidos do processo de hidroerosão

Acredita-se que esta etapa de sucção não seja suficientemente eficiente para remover todo o óleo de exame retido no bico injetor, e que um volume residual do mesmo estaria sendo levado pelo bico injetor para a próxima estação, diluindo assim o fluido erosivo (estação 2). A diferença de viscosidade dos óleos é muito grande, então a mistura dos dois por a contaminação seria suficiente para causar uma redução de viscosidade do fluido erosivo.

### 3.5.2 Simulação da contaminação do óleo de processo

Para simular a contaminação do fluido erosivo pelo óleo de exame durante a usinagem dos bicos injetores primeiramente é necessário estimar a quantidade deste fluido que permanece nas peças após a etapa de sucção na estação 1, determinando a quantidade de fluido que é realmente arrastada para a estação 2. Para isso foram escolhidos 10 bicos injetores com características semelhantes aos que já são produzidos no equipamento, imediatamente após a etapa de sucção, sendo que os bicos injetores foram retirados do processo antes de chegarem à Estação 2.

Para determinação da quantidade de óleo residual nas amostras, as 10 peças foram colocadas em um béquer com 120 ml de solvente hexano, que foi por sua vez colocado em um equipamento de ultrassom por 30 min para completa remoção do óleo de exame impregnado nas peças. A solução resultante do processo de limpeza

no ultrassom foi colocada em um balão volumétrico e então aquecida até 200°C para a completa evaporação do solvente. A Figura 3.4 mostra o balão volumétrico após a evaporação do hexano e o resíduo no fundo do balão, representando o óleo retido nos bicos injetores.

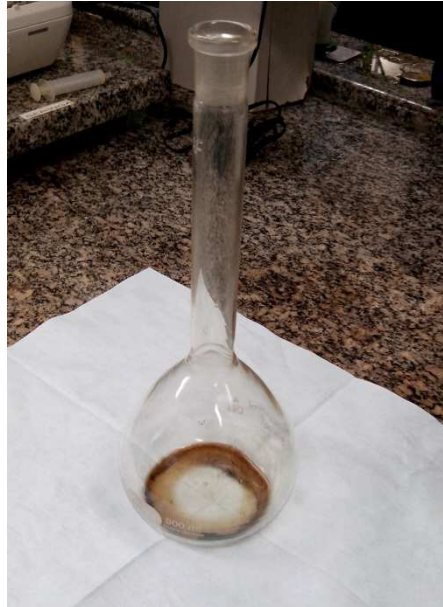


Figura 3.4 - Óleo de exame retido nos bicos injetores restante após a extração do óleo residual com hexano.

A partir da equação (3.5), em que A corresponde à massa do balão volumétrico após a destilação da amostra em gramas e B corresponde a massa do balão vazio em gramas, tem-se que o teor de óleo em 10 peças é de 1,5 g.

$$m_{\text{óleo}} = A - B \quad (3.5)$$

Uma amostra de óleo de exame de 50 ml possui uma massa de 41 g, então a densidade do óleo é de 0,82 g/cm<sup>3</sup>, que está de acordo com os dados fornecidos pelo fabricante do óleo. A partir da equação (3.6), dividindo-se a quantidade de óleo em gramas encontrada nas peças pela densidade e convertendo-se a unidade, tem-se que o volume de óleo retido em 10 peças é de 1,85 ml.

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (3.6)$$

A partir dos dados de produção obtidos após o monitoramento de 160 horas, é possível determinar a quantidade de bicos injetores produzidos em cada intervalo.

Com base nestes resultados torna-se possível estimar o volume de óleo de exame que é arrastado para a estação 2 em cada intervalo, multiplicando-se o volume de óleo retido em uma peça (0,185 ml) pelo número de bicos produzidos no intervalo, conforme demonstrado pela equação (3.7), em que  $V_{\text{óleo}}$  corresponde ao volume de óleo de exame arrastado, 0,185 ml representa o volume de óleo retido em uma peça (0,185 ml) e  $N_i$  representa a quantidade de bicos injetores  $j$  produzidos no lote.

$$V_{\text{óleo}} = 0,185 * \sum_{j=1}^{N_i} \quad (3.7)$$

A partir deste resultado pode-se estimar qual o volume de óleo de exame responsável pela possível contaminação do óleo de processo. Partiu-se então para uma etapa de simulação em bancada da contaminação do óleo de processo pelo óleo de exame utilizando-se uma regra básica de diluição.

Sabendo-se que o monitoramento também permite concluir qual é a redução da viscosidade em cada intervalo, é possível avaliar a partir dos testes de simulação se a quantidade arrastada é suficiente para provocar a redução na viscosidade correspondente ao que acontece no processo.

Os valores de viscosidade observados na simulação foram então comparados aos resultados empíricos do monitoramento no processo em série, para determinar a influência da contaminação no efeito de redução da viscosidade do fluido erosivo.

### 3.5.3 Análise por espectrometria de massa

A análise das amostras foi realizada por cromatografia gasosa (*Agilent Technologies 7890*) acoplado a um detector de massa triplo quadrupolo (*Agilent Technologies 7000*) que possui amostrador automático (*Agilent Technologies 80*). As análises foram realizadas no laboratório LEAQUA (Laboratório de Estudos avançados em Química Ambiental) do DAQBI – Departamento de Química e Biologia da UTFPR, campus Ecoville.

Foi realizada a separação cromatográfica e a determinação da composição por espectrometria de massa verificando se ocorreram mudanças na composição e na estrutura do óleo que compõe o fluido erosivo. Para tal, foram analisadas uma

amostra de óleo de processo novo (ISO-32) sem utilização e de amostras que apresentaram diferentes etapas de utilização. As amostras foram a A1, A5, A6 e A10, por representarem respectivamente os estágios inicial, intermediário e final do monitoramento.

Na separação foi empregada uma coluna capilar HP-5Msi (30m × 0.25mm × 0.25 µm). Uma rampa de aquecimento foi selecionada para a análise, sendo que a mesma está apresentada na Figura 3.5.

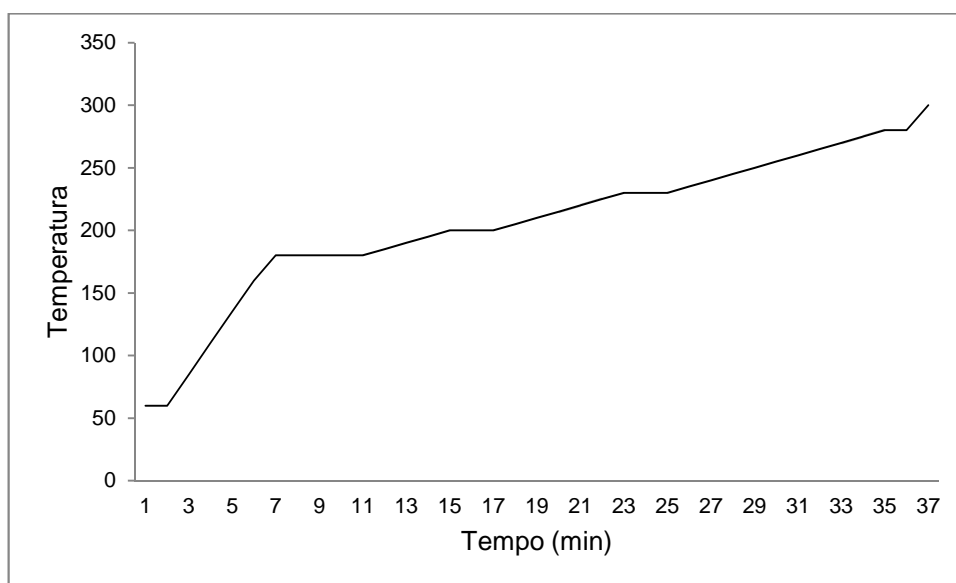


Figura 3.5 – Rampa de aquecimento para análise de espectrometria de massa

A temperatura do injetor e do *transfer line* foi de 280°C e a temperatura da fonte foi de 270°C. A pressão na coluna cromatográfica foi de 10,42 psi, com um fluxo constante de Hélio de 1,2 ml.min<sup>-1</sup>. As injeções foram feitas no modo splitless com a injeção de 1µl de amostra que foram diluídas 20 vezes. A energia do íon a ser utilizada para a ionização por impacto de elétrons no espectrômetro de massa será de 70 eV com temperatura da fonte de 250°C, em MRM (*multiple reaction mode*).

## 4 RESULTADOS

Os resultados obtidos a partir do monitoramento e ajuste da viscosidade do fluido erosivo são apresentados neste capítulo a partir da análise da eficiência do processo de hidroerosão e da causa raiz para a redução da viscosidade do fluido erosivo.

### 4.1 Caracterização do fluido erosivo (Etapa 3)

Nesta seção são apresentados os resultados da caracterização do fluido erosivo no que se refere à concentração volumétrica de partículas, viscosidade e distribuição de tamanho durante o período de monitoramento.

#### 4.1.1 Concentração volumétrica de sólidos

Com base na equação ((3.1)) já apresentada (p. 48) é possível calcular as concentrações volumétricas de partículas no fluido erosivo,  $\phi_p$ , apresentadas na Tabela 4.1. As amostras utilizadas foram coletadas sempre após as correções de viscosidade conforme Etapa 5 da seção 3.4.1. A definição das amostras para avaliação da concentração volumétrica de partículas foi baseada no efeito que a diluição do óleo de processo pode provocar na concentração e também para avaliar se a correção da viscosidade pode manter a concentração de sólidos, uma vez que durante o período de monitoramento não foram feitas adições de partículas abrasivas ao fluido erosivo em operação.

Tabela 4.1 - Concentrações volumétricas do fluido erosivo (amostras A1, A4, A8, A13 e A17)

Amostra	$\phi_p$
A1	14
A4	14
A8	13
A13	12
A17	11,5



Durante o período de 160 horas, a concentração de partículas sólidas teve uma redução de aproximadamente 18 %. No decorrer do monitoramento não foram realizadas adições de partículas abrasivas, sendo assim, a variação da concentração está relacionada à diluição do fluido erosivo após os ajustes com óleo de correção, uma vez que dependendo da quantidade de óleo adicionada, existe a necessidade da retirada de uma parcela do fluido erosivo do tanque para não ultrapassar o limite volumétrico do tanque, que é de 65 l. Outro fator relacionado à redução na concentração é a perda de partículas sólidas devido ao arraste de fluido erosivo para as demais estações do equipamento de hidroerosão.

#### 4.1.2 Viscosidade do óleo filtrado a partir do fluido erosivo

Durante o período monitorado foram coletadas amostras em todos os intervalos, totalizando 17 amostras em um período de 160 horas. Os resultados para as viscosidades dinâmicas do fluido erosivo filtrado estão apresentadas na Figura 4.1.

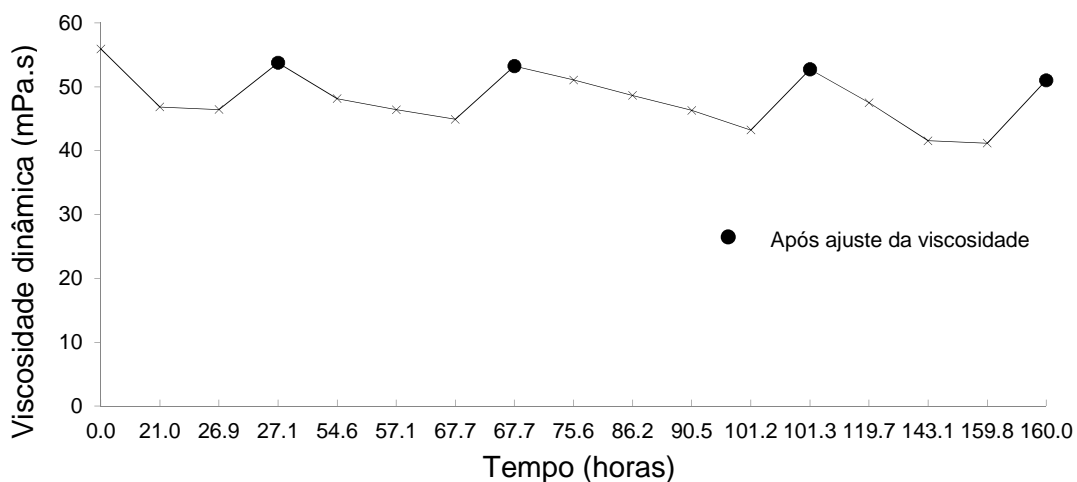


Figura 4.1 - Viscosidade das amostras do fluido erosivo filtrado a 25°C.

A viscosidade do óleo filtrado apresentou uma variação média de 32,7 % em relação ao valor nominal do óleo (ISO-32) em um período médio de 40 horas e a compensação da viscosidade ocorreu em média a cada 40 horas. Considerando-se a viscosidade inicial de 56 mPa.s, a efetividade das correções de viscosidade para retorno do fluido erosivo à condição inicial foi de 94 % em média, fazendo com que a viscosidade se mantivesse estável durante as 160 horas.

Os valores utilizados como referência para viscosidade do óleo filtrado das amostras A1 até A17 estão indicados no Apêndice B. Cabe ressaltar que os valores estão relacionados à viscosidade para a qual o torque máximo foi atingido no viscosímetro, conforme procedimento descrito na seção 3.1.

#### 4.1.3 Distribuição de tamanho de partículas e análise do acoplamento

As distribuições de tamanhos das partículas para as amostras A1 e A7 estão apresentadas nas Figuras 4.2 e 4.3 na forma de distribuição de frequência em volume. Estes resultados se referem às amostras com o maior e o menor resultado de viscosidade, respectivamente.

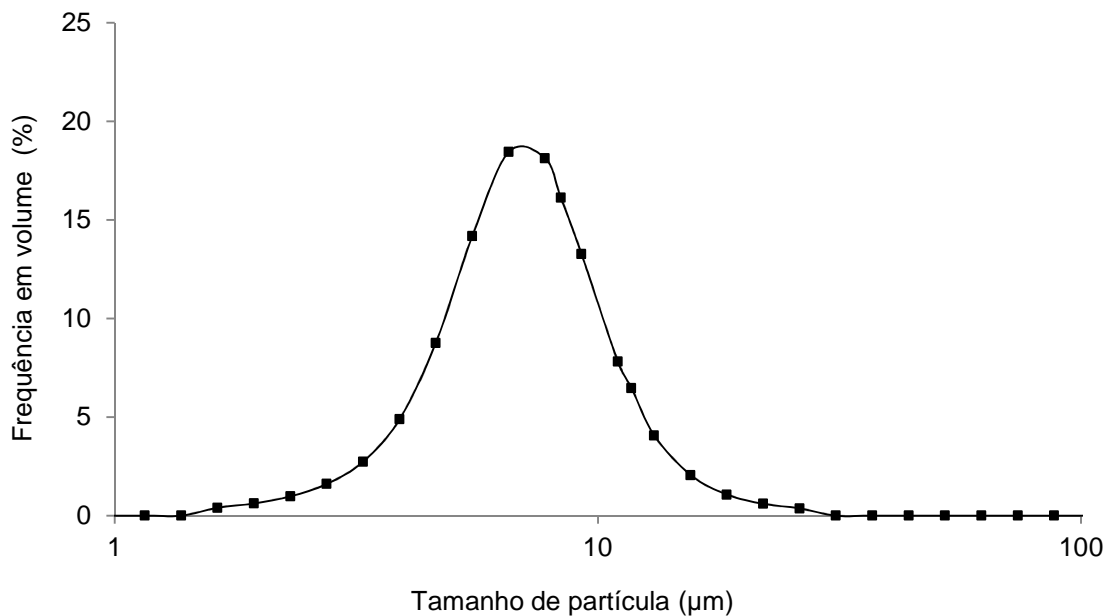


Figura 4.2 – Distribuição de frequência de tamanho de partículas em volume para a amostra A1

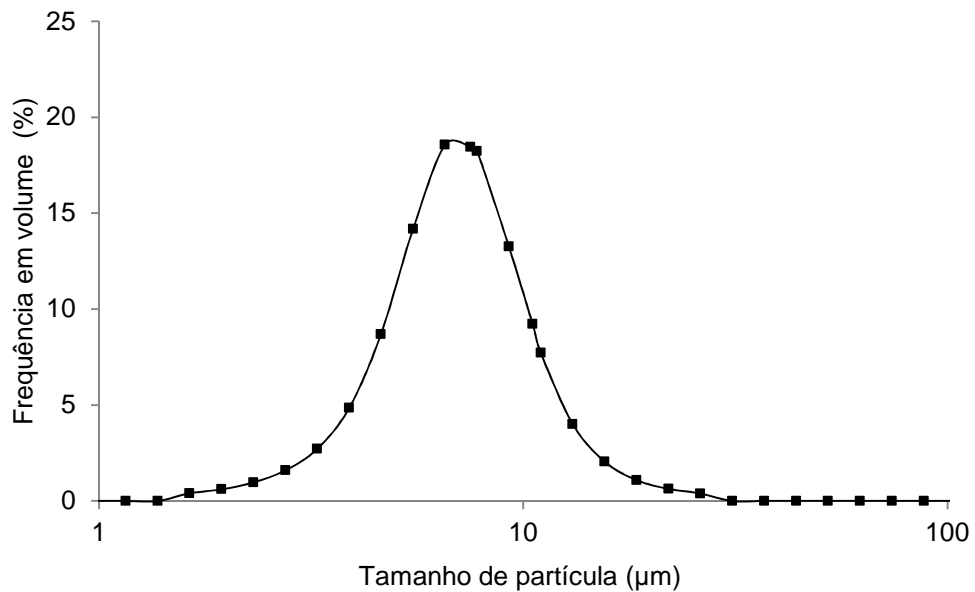


Figura 4.3 – Distribuição de frequência de tamanho de partículas em volume para a amostra A7

Para melhor avaliação da distribuição de tamanho, faz-se necessário avaliar os parâmetros estatísticos  $d_{10}$ ,  $d_{50}$  e  $d_{90}$  das duas amostras, apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Parâmetros de distribuição de tamanho de partículas de carvão de boro,  $d_{10}$ ,  $d_{50}$  e  $d_{90}$

Diâmetro $d_p$ (µm)	Abrasivo novo	Amostra	
		A1	A7
$d_{10}$	2,5	3,6	3,7
$d_{50}$	6,8	6,2	6,3
$d_{90}$	10,7	11,0	10,4

Com base nestes resultados, tem-se que para o abrasivo novo, 10 % do volume de partículas possui diâmetro menor do que 2,5 µm, 50 % possui diâmetro menor do que 6,8 µm e 90 % são menores do que 10,7 µm. Já na amostra A1, 10 % do volume de partículas possui diâmetro menor do que 3,6 µm, 50 % possui diâmetro menor do que 6,2 µm e 90 % são menores do que 11 µm. Por fim, para a amostra A7, 10 % do volume de partículas possui diâmetro menor do que 3,72 µm, 50 % possui diâmetro menor do que 6,34 µm e 90 % são menores do que 10,43 µm.

Estes resultados mostram que as amostras A1 e A7 não possuem grande variação no que se refere à distribuição de tamanho de partículas. Porém estes resultados são importantes para a análise de acoplamento das partículas conforme seção 5.1.

#### 4.2 Avaliação da eficiência da correção da viscosidade (Etapa 7)

Para avaliar a eficiência da correção de viscosidade, os resultados da taxa média de arredondamento foram analisados por representarem o principal indicador para eficiência do processo, conforme já definido na equação (3.4) (p. 52). A análise de eficiência foi realizada em momentos definidos pela passagem de um determinado tipo de bico injetor na linha, o qual já foi objeto de estudos anteriores (COSEGLIO, 2013). Esta definição foi realizada para que se pudesse ter uma base comparativa coerente sobre o real efeito do ajuste da viscosidade do fluido erosivo no processo hidroerosão. A taxa média de arredondamento é apresentada na Figura 4.4.

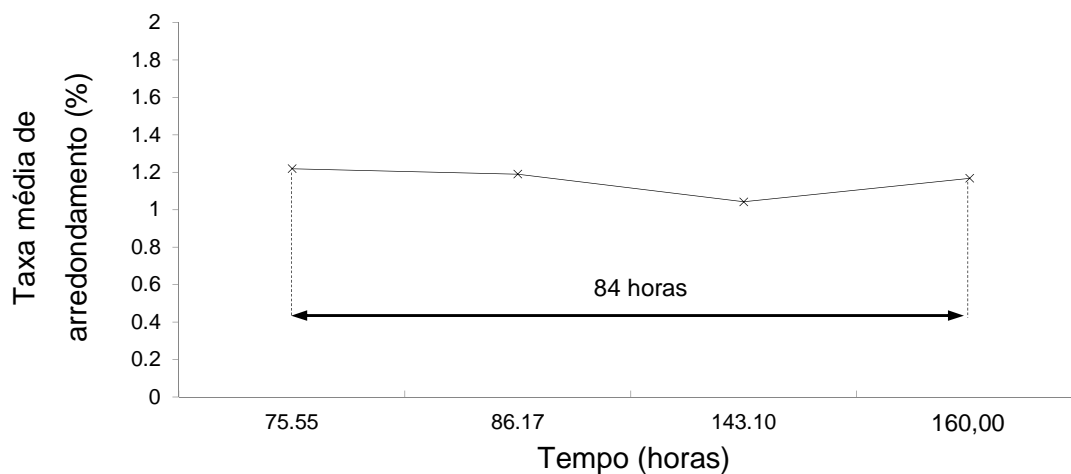


Figura 4.4 - Taxa média de arredondamento

Os resultados da taxa média de arredondamento mostram que houve uma variação de 4,2 % em relação a primeira e a última avaliação em 84 horas, sendo que neste período ocorreram duas correções de viscosidade. Os resultados e a referência das amostras são demonstrados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Taxa média de arredondamento (%) das amostras.

Amostra	Tempo acumulado (horas)	Taxa média de arredondamento (%)
A9	75,55	1,22
A10	86,17	1,19
A15	143,10	1,04
A17	160,00	1,17

#### 4.3 Avaliação da causa raiz para a redução da viscosidade do fluido erosivo

Os dados de produção levantados após o monitoramento de 160 horas apontam que em um período de 40 horas são produzidos aproximadamente 14000 bicos injetores. Por sua vez, os resultados das medições de viscosidade do óleo filtrado no período do monitoramento mostram que a redução de viscosidade em um período médio de 40 horas, sem correção de viscosidade, possui valor médio de 10 mPa.s a 25°C.

Conforme metodologia apresentada na seção 3.5.2 é possível estimar o volume de óleo de exame arrastado para a Estação 2 em cada intervalo, multiplicando-se o volume de óleo retido em uma peça (0,185 ml) pelo número de bicos produzidos no intervalo. A partir da equação (3.7) (p. 56), tem-se que o volume de óleo de exame arrastado para a Estação 2 é de 2590 ml em um período médio de 40 horas.

A partir deste resultado, partiu-se para uma etapa de simulação em bancada da contaminação do óleo de processo ISO-32 (Estação 2) pelo óleo de exame (Estação 1). Para tal, foram utilizadas amostras de óleo de processo e de óleo de exame em condições de fornecimento. O conceito da simulação baseia-se na adição de óleo de exame à amostra de óleo de processo, conforme as proporções obtidas no processo em série, além de avaliar a relação existente entre a redução de viscosidade obtida na simulação e a observada no processo em série.

Considerando o volume do tanque 2 de óleo de processo (ISO-32) constante (65 l), a contaminação resultante do fluido erosivo dada pela equação (4.1) é de  $\approx 4$  % em volume.

$$x = \frac{2,590}{65} \times 100 \% \text{ volume} \quad (4.1)$$

A simulação foi realizada com 100 ml de óleo de processo ISO-32.

Durante a simulação, todas as medições de viscosidade foram feitas seguindo a mesma metodologia, descrita na seção 3.1. As primeiras medições de viscosidade foram realizadas para os dois óleos separadamente, uma vez que os resultados fornecidos pelo fabricante são em viscosidade cinemática a 40 °C, sendo então necessário fazer a verificação prática da viscosidade dinâmica a 25 °C para ambos os óleos. A partir dos resultados, tem-se que os óleos de processo e exame, possuem viscosidades dinâmicas medidas a 25 °C de 58,25 mPa.s e 15,22 mPa.s, respectivamente.

Para avaliar a redução de viscosidade a partir da simulação, 4 ml de óleo de exame foram adicionados aos 100 ml de óleo de processo. A mistura resultante inserida em um béquer, foi levada ao equipamento de ultrassom para garantir sua completa homogeneização. Após esta etapa foi então realizada uma medição de viscosidade, resultando em um valor de viscosidade dinâmica a 25°C de 54,5 mPa.s. Esta redução da viscosidade corresponde a uma diferença de 3,75 mPa.s em relação ao valor inicial da viscosidade do óleo de processo que é de 58,25 mPa.s.

Adicionalmente, foi realizada uma simulação do volume necessário de óleo de exame para alcançar a redução de viscosidade de 10 mPa.s a 25°C que ocorre no processo em série em um período médio de 40 horas sem correção de viscosidade. Os resultados mostrados através da Tabela 4.4 apontam que seria necessário adicionar 13,5 ml de óleo de exame em 100 ml de óleo de processo para se atingir a viscosidade de 48,25 mPa.s.

Tabela 4.4 - Variação da viscosidade em função da adição do óleo de exame.

Volume de óleo de exame (ml)	Viscosidade dinâmica a 25°C (mPa.s)
0,0	58,3
2,5	55,8
4,0	54,5
7,0	52,5
11,0	49,9
13,5	48,3

#### 4.3.1 Análise de espectrometria de massa e cromatografia gasosa

Os resultados das análises de espectrometria de massa podem ser interpretados a partir de registros gráficos conhecidos por cromatogramas. Neste registro gráfico é possível visualizar a separação dos componentes da mistura, e pelos tempos de retenção e pelas áreas dos picos, pode-se determinar a concentração de cada substância na mistura.

O cromatograma da Figura 4.5, refere-se a amostra A1, não sendo observado nenhum pico que indique a presença de algum composto específico. A elevação da linha de base após 12 minutos de análise não é representativa e está de acordo com análises para óleos minerais de estrutura complexa.

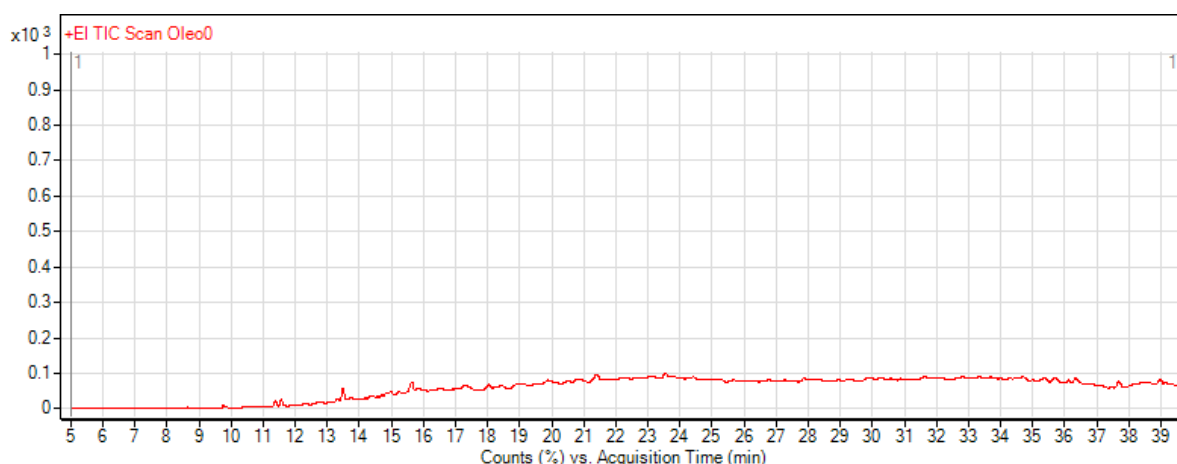


Figura 4.5 - Cromatograma da amostra A1

Já no cromatograma da Figura 4.6, referente à amostra 5, nota-se a presença de um pequeno pico próximo aos 7 minutos, não sendo um indicativo de degradação do óleo, mas sim a presença de compostos, que não estavam presente na amostra A1. A mesma elevação também é observada após 12 minutos de análise.

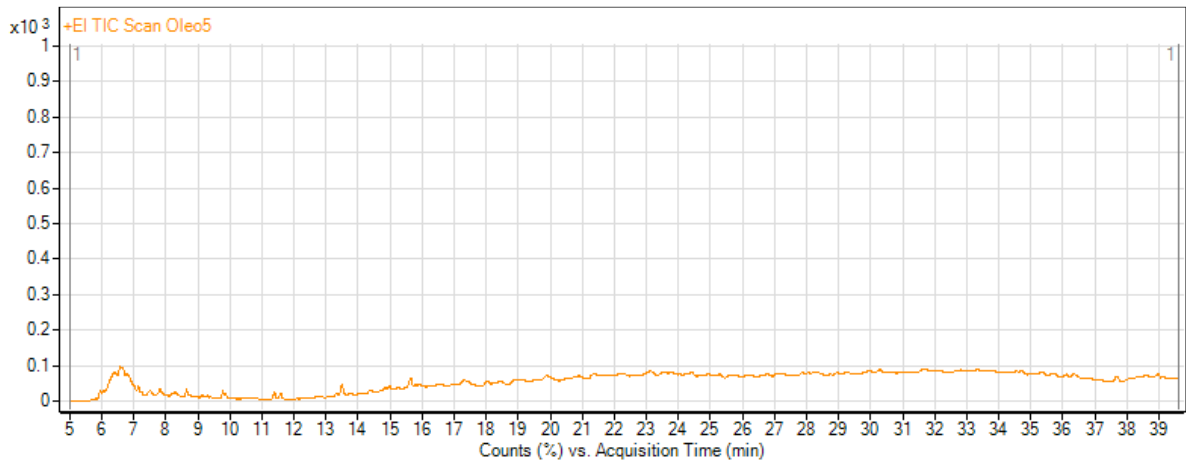


Figura 4.6 - Cromatograma da amostra A5

O cromatograma da amostra A6, representado pela Figura 4.7, apresenta, da mesma maneira que na amostra A5, um pico próximo aos 7 minutos, o que também indica a presença de alguma substância diferente da amostra A1. A elevação da linha base também ocorre depois de decorridos 12 minutos de análise.

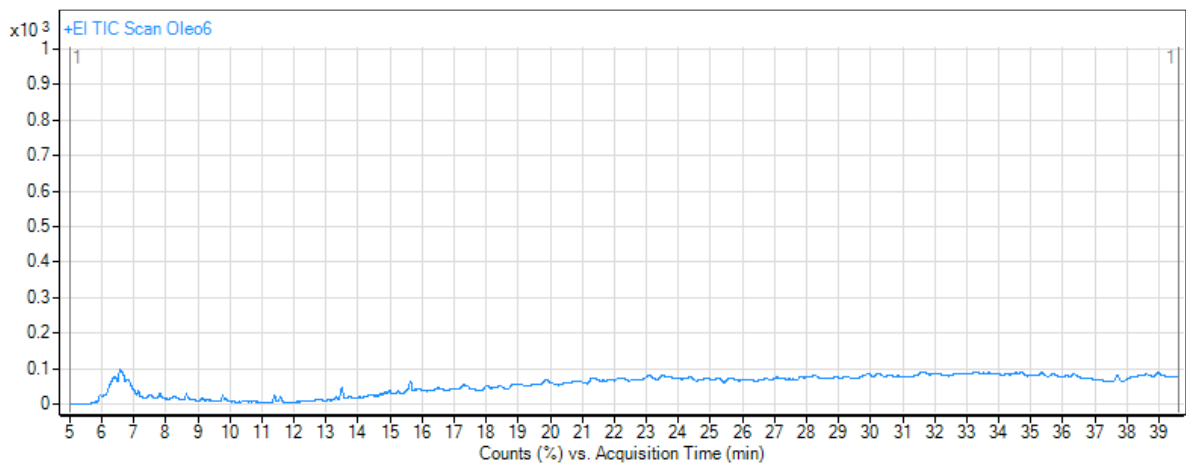


Figura 4.7 - Cromatograma da amostra A6

Por fim, o cromatograma da amostra 10, apresentado na Figura 4.8, mostra-se semelhante aos das amostras A5 e A6, apresentando o pico da presença de alguma



substância próximo aos 7 minutos de análise. Assim como para as amostras A5 e A6, também tem a elevação da linha base depois de 12 min.

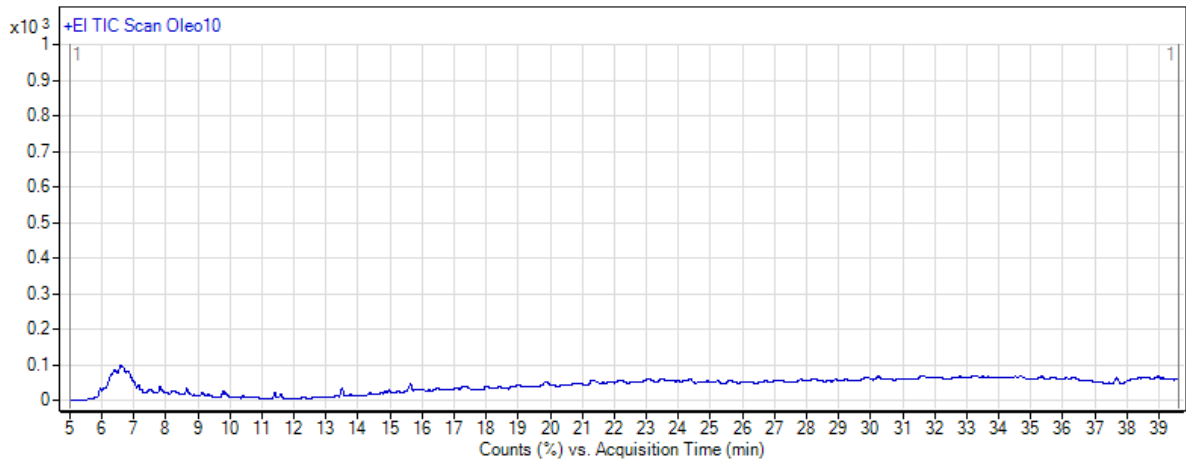


Figura 4.8 - Cromatograma da amostra A10

A Figura 4.9 traz todos os cromatogramas anteriores compilados em um único gráfico, mas com a escala de intensidade diferenciada. O pico observado próximo aos 7 minutos tem a mesma intensidade em todas as análises, exceto no cromatograma da amostra A1. Com relação a linha base, houve um decréscimo de intensidade de acordo com a escala das amostras, porém não significativo.

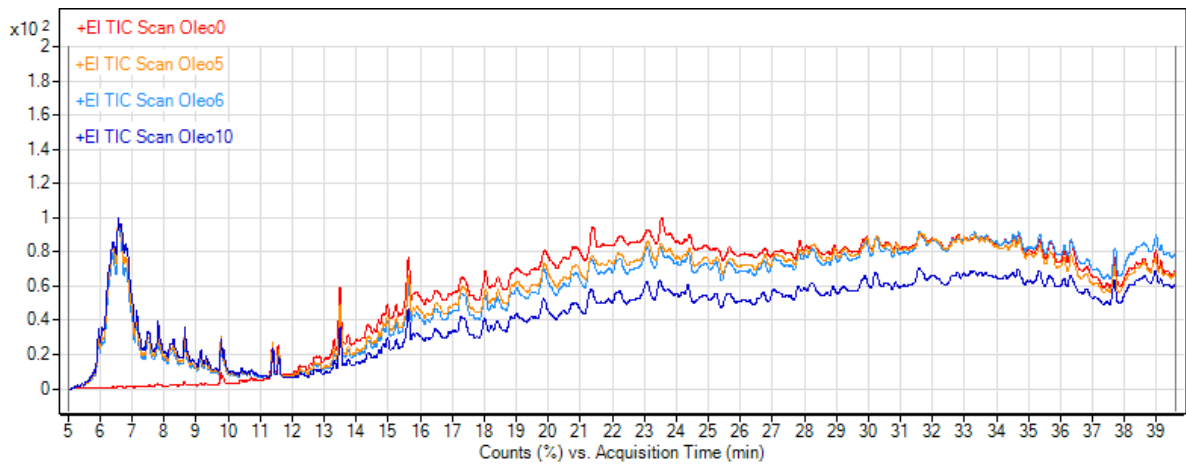


Figura 4.9 - Cromatograma das amostras A1, A5, A6 e A10

## 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão discutidos os resultados apresentados no Capítulo 4, baseando-se para isso no efeito do ajuste da viscosidade do fluido erosivo sobre a eficiência de remoção de material do processo de usinagem por hidroerosão, além da discussão dos resultados obtidos por meio da simulação da contaminação do óleo de processo, que possibilitem esclarecer os motivos que levam a redução de viscosidade no processo ao longo do tempo.

### 5.1 Efeito do ajuste de viscosidade do fluido erosivo na eficiência da usinagem por hidroerosão

Conforme já discutido na seção 2.4.1, óleos lubrificantes passam por um complexo processo de alteração em sua estrutura química quando em operação como resultado de ação térmica, física e oxidativa sofrida ao longo de sua vida útil. O monitoramento da condição de óleos, segundo VOORT *et al* (2011), pode ser estabelecido para avaliar as mudanças na qualidade do óleo lubrificante em relação ao seu regime original e sua habilidade em exercer a função a qual foi designado, tendo foco em fatores que afetam a performance e confiabilidade do equipamento ou processo e permite tomar decisões, como a troca do óleo ou a utilização de aditivos para minimizar os impactos sofridos pelo óleo ao longo do tempo. Neste sentido, o método de ajuste da viscosidade utilizando um óleo de correção desenvolvido junto ao atual fornecedor do óleo de processo pode ser apontado como uma alternativa para manutenção da viscosidade do fluido erosivo em relação aos valores nominais de trabalho.

Estudos anteriores de COSEGLIO (2013) sobre o processo de hidroerosão em bicos injetores apontam que a viscosidade do fluido erosivo sem renovação de partículas abrasivas e óleo teve uma redução de 50% após um intervalo de 100 horas de uso. No presente estudo, a variação de viscosidade durante um período de 160 horas de monitoramento foi de 8,8% considerando a primeira amostra A1 e a última amostra A17, além de apresentar uma redução média de 18% entre os

intervalos de ajuste de viscosidade. A Figura 5.1 mostra um comparativo entre os resultados alcançados pelos dois estudos.

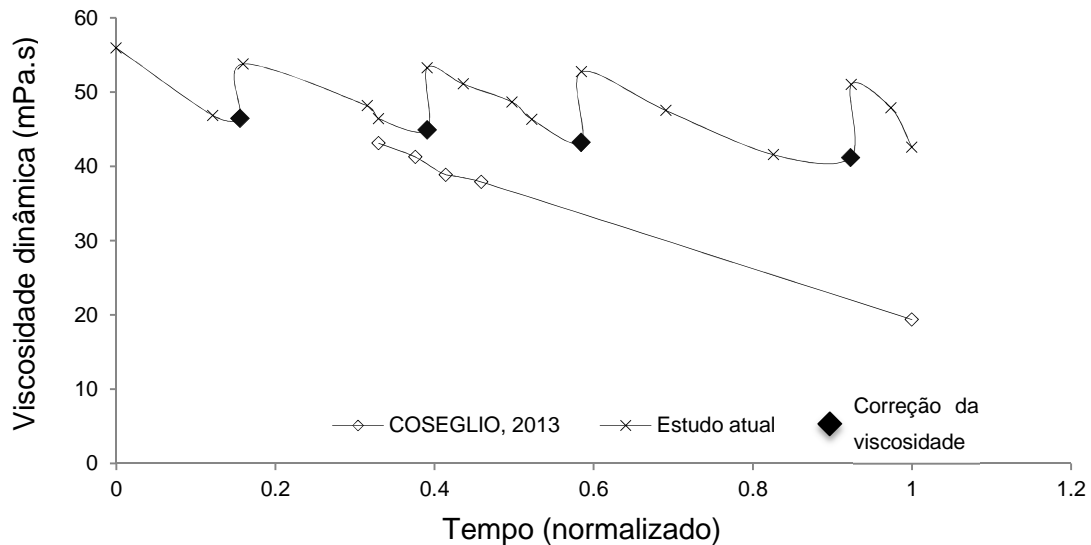


Figura 5.1 - Comparativo entre resultados de viscosidade em diferentes estudos

A eficiência da metodologia de ajuste da viscosidade pode ser comprovada a partir dos resultados da taxa média de arredondamento utilizando um tipo específico de bico injetor para análise, que apontam uma redução de 4,2 % em 84 horas de trabalho com duas etapas de ajuste de viscosidade neste período, representando uma redução de 4,2 % na eficiência de remoção de material do processo de hidroerosão. Resultados anteriores de COSEGLIO (2013) apresentam uma redução de 20 % da taxa média de arredondamento para um intervalo de 150 horas de uso do fluido erosivo sem renovação de partículas abrasivas e óleo, considerando o mesmo tipo específico de bico injetor utilizado no presente estudo.

Por sua vez, os resultados da concentração volumétrica de partículas mostram uma redução de aproximadamente 18 % no decorrer de 160 horas, que está relacionada a diluição gradativa do fluido erosivo e também do arraste de partículas para as demais estações do equipamento de hidroerosão. A redução da concentração de partículas abrasivas influencia na eficiência do processo de usinagem por hidroerosão, uma vez que quanto maior a concentração, maior a remoção de material, conforme observado no processo produtivo de usinagem por hidroerosão.

Com base nos resultados apresentados, tem-se que a concentração volumétrica de partículas sólidas e a viscosidade influenciam a taxa média de arredondamento do processo de usinagem por hidroerosão. De acordo com COSEGLIO (2013), estas duas propriedades influenciam diretamente o nível de acoplamento entre partícula e fluido, fator considerado determinante para a condição de impacto da partícula nas paredes dos canais de injeção.

No que se refere à distribuição de tamanho e sua correlação com o acoplamento das partículas abrasivas, a Figura 5.2 representa a amostra A1, que possui um resultado da medição de viscosidade de 55,9 mPa.s. Para esta amostra, 77,4% do volume de partículas possui alto acoplamento, representando as partículas com diâmetro menor do que 8,385  $\mu\text{m}$ , já as partículas com diâmetro entre 8,385  $\mu\text{m}$  e 11,745  $\mu\text{m}$  representam 16,48% do volume de partículas e apresentam um acoplamento intermediário, por fim, 6,135% do volume de partículas possui baixo acoplamento, com partículas com diâmetro maior que 11,745  $\mu\text{m}$ .

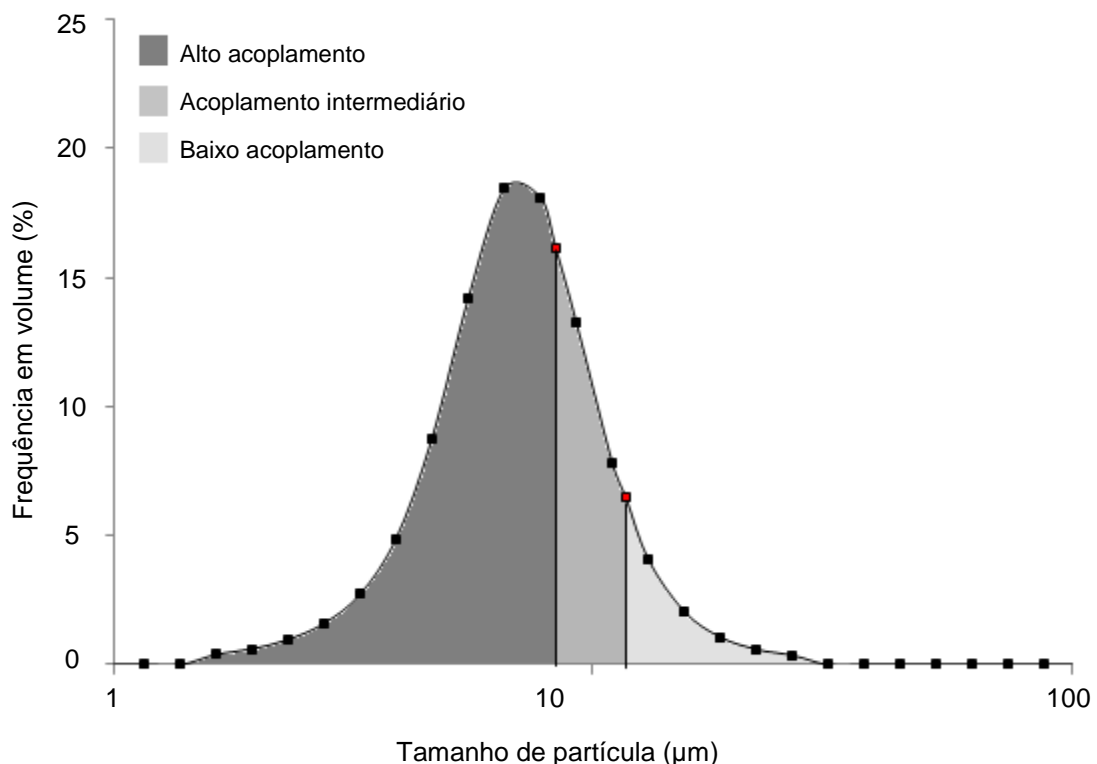


Figura 5.2 - Porcentagem em volume de partículas de acordo com o acoplamento para a amostra A1

A distribuição de tamanho para a amostra A7, que apresentou viscosidade de 44,9 mPa.s, representada na Figura 5.3, mostra que 61,73% do volume de partículas apresenta alto acoplamento, representando as partículas com diâmetro menor do que 7,515  $\mu\text{m}$ , já as partículas com diâmetro entre 7,515  $\mu\text{m}$  e 10,525  $\mu\text{m}$  representam 26,24% do volume de partículas e apresentam um acoplamento intermediário, por fim, 12,3% do volume de partículas possui baixo acoplamento, apresentando diâmetro maior que 10,525  $\mu\text{m}$ .

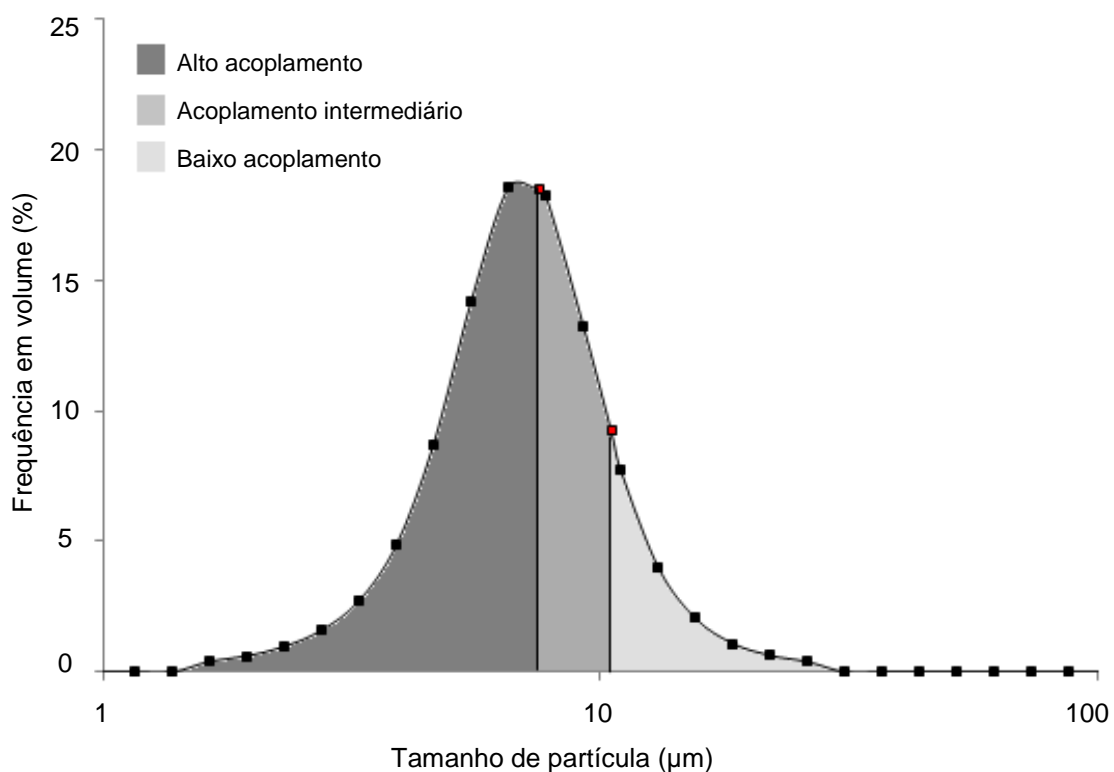


Figura 5.3 - Porcentagem em volume de partículas de acordo com o acoplamento para a amostra A7

Quando analisada a distribuição de tamanho isoladamente tem-se que os parâmetros estatísticos  $d_{10}$ ,  $d_{50}$  e  $d_{90}$  das amostras A1 e A7 não apresentam grande variação, mas a avaliação de acoplamento foi afetada de maneira significativa pela variação na viscosidade. Estes resultados convergem no sentido de que a viscosidade é um dos fatores que mais influencia no acoplamento, uma vez que a amostra A1 apresentou o maior resultado de viscosidade e também o maior volume de partículas com alto acoplamento, quando comparada a amostra A7, que

apresentou o menor resultado de medição de viscosidade na população das 17 amostras coletadas.

Comparando os resultados obtidos por COSEGLIO (2013) com os do presente estudo, conforme Tabela 5.1, tem-se que o ajuste da viscosidade foi responsável pela manutenção de um maior volume de partículas com alto acoplamento no fluido erosivo do processo de hidroerosão ao longo do tempo.

Tabela 5.1 - Comparativo entre o estudo de COSEGLIO (2013) e o trabalho atual no que se refere ao acoplamento das partículas

Classificação do acoplamento	% em volume de partículas			
	COSEGLIO (2013)		Presente Estudo	
	A1	A5	A1	A7
Alto acoplamento	55,8	38,5	77,4	61,7
Acoplamento Intermediário	40,9	38,9	16,5	26,2
Baixo acoplamento	3,3	22,6	6,1	12,3

## 5.2 Análise da causa raiz da redução de viscosidade do fluido erosivo

No estudo em questão, a temperatura de trabalho é mantida constante a 25 °C devido ao sistema de refrigeração existente no equipamento de hidroerosão, sendo assim, as variações de viscosidade encontradas não estão relacionadas com uma variação de temperatura.

A redução da viscosidade do fluido erosivo do processo de hidroerosão já foi avaliada em estudos anteriores por COSEGLIO (2013) utilizando análise espectral no infravermelho para identificação de mudanças na composição química do óleo que pudessem justificar uma redução na viscosidade por mecanismo de oxidação do óleo. As medições foram realizadas no Laboratório de Análises Químicas do Departamento Acadêmico de Química e Biologia (DAQBI) da UTFPR utilizando o espectrofotômetro *Varian* modelo 640 e procedimento conforme ASTM E 1252-98. Resultados mostraram que não existe variação na composição química do óleo.

Porém, conforme apresentado na seção 2.4, WU *et al* (2013) relata que a degradação por oxidação de óleos lubrificantes pode levar a formação de vários compostos contendo oxigênio, tais como ácidos, aldeídos, ésteres, cetonas, peróxidos e álcoois, sendo que o processo de polimerização destes produtos primários do processo de oxidação gera moléculas de alta massa molar durante os últimos estágios das reações, resultando na formação de borra e verniz com um associado aumento da viscosidade. Sendo assim, descarta-se a hipótese de redução de viscosidade associada à oxidação do óleo, uma vez que a oxidação teria um efeito contrário no que se refere à viscosidade.

Conforme discutido na seção 2.2, STACHOWIAK e BATCHELOR (1993) indicam que podem ocorrer variações de viscosidade em óleos minerais por diversos fatores, sendo que a redução na viscosidade do óleo pode estar associada à contaminações por fluidos de menor viscosidade. Dentro deste contexto, a contaminação do fluido erosivo pelo óleo de exame utilizado na estação 1 pode estar relacionada à redução da viscosidade.

Os resultados da simulação da contaminação a partir da mistura de óleo de exame com o óleo utilizado no fluido erosivo mostraram uma redução da viscosidade correspondente a uma variação de 3,75 mPa.s em relação ao valor inicial da viscosidade do óleo de processo que é de 58,25 mPa.s. Considerando que a redução de viscosidade durante um período médio de 40 horas é de 10 mPa.s, estes resultados apontam que a contaminação do fluido erosivo pelo óleo de exame contribuem com o efeito de redução de viscosidade em 37,5 %.

Além disso, considerando que a temperatura utilizada no ensaio de determinação do teor de óleo presente nas peças foi de 200 °C, pode-se afirmar que parte do óleo de exame presente na solução com hexano, foi volatilizada durante o ensaio, uma vez que o óleo de exame tem a viscosidade na faixa do diesel e, portanto, sua curva de ebulição começa abaixo de 100 °C, indo até ~360 °C, sendo possível estimar uma evaporação de cerca de 30 % do óleo de medição a 200 °C. Desta forma, tem-se que a contaminação do óleo de processo pelo óleo de exame é responsável por aproximadamente 67,5% da redução de viscosidade do fluido erosivo do processo de hidroerosão.

Outros fatores externos que não podem ser quantificados, tais como vazamentos nas conexões da estação de medição e falta de eficiência no sistema de sucção de óleo de exame após a medição podem também contribuir para o aumento desta contaminação, que se mostrou muito significativa no processo e para a redução de viscosidade de fluido erosivo.

Por sua vez, os resultados da espectrometria de massa, mostram que existe alteração na composição química do óleo. Conforme espectrograma da Figura 4.9 (p. 67) pode-se observar alteração na composição do óleo das amostras A5, A6 e A10, quando comparado ao óleo da amostra A1. Conforme já mencionado anteriormente (seção 2.4.1), a oxidação de óleos lubrificantes a 90 °C apresenta pouca variação quanto a alteração de características. Por sua vez, no presente estudo, a temperatura do fluido erosivo se mantém constante a 25°C, não sendo previsto, portanto, a ocorrência de processos oxidativos. Desta forma, a alteração na estrutura química do óleo deve-se provavelmente à contaminação do fluido erosivo pelo óleo de exame (óleo leve). Este fato pode ser visualizado pela evolução das mudanças nos cromatogramas, indicando o aparecimento de compostos mais voláteis, ou seja, de menor massa molar, e conseqüentemente, menos viscosos.

Uma análise mais detalhada utilizando-se padrões específicos pode ser realizada no futuro para quantificar os compostos químicos do óleo utilizado no fluido erosivo, porém, a partir dos resultados qualitativos obtidos, pode-se afirmar que a alteração na estrutura química do óleo ao longo do tempo está associada à redução da viscosidade do óleo ao longo do tempo.



## 6 CONCLUSÃO

A partir da análise dos resultados apresentados neste trabalho referentes a um monitoramento do processo de usinagem por hidroerosão durante 160 horas utilizando método para ajuste da viscosidade, além da análise da causa da redução da viscosidade do fluido erosivo, as seguintes conclusões são apresentadas:

1. A viscosidade do fluido erosivo pode ser controlada a partir da utilização de um óleo de maior viscosidade como fluido de correção para ajuste dos valores de viscosidade ao longo do tempo. Durante o período monitorado a redução de viscosidade foi de 8,8 % considerando a primeira amostra A1 e a última amostra A17, sendo que esta variação é cerca de 5 vezes menor do que a variação encontrada em estudos anteriores sem ajuste de viscosidade.
2. O método de ajuste da viscosidade teve sua eficiência comprovada por meio dos resultados da taxa de arredondamento médio, que teve uma redução de apenas 4,8 %, dada principalmente pela variação na viscosidade do óleo, que por mais que tenha sido reduzida, ainda continua com tendência de redução nos intervalos entre os ajustes.
3. Os resultados alcançados em termos de estabilidade da viscosidade do fluido erosivo e da eficiência no que se refere à taxa de arredondamento médio, certificam que o método criado para ajuste de viscosidade do fluido erosivo é viável para uma futura implementação no processo produtivo de usinagem por hidroerosão na planta industrial da Robert Bosch em Curitiba.
4. O estabelecimento do método de ajuste de viscosidade apresenta como sua maior vantagem a possibilidade de otimização do uso do fluido erosivo, evitando trocas desnecessárias, além de evitar sua degradação prematura por diluição, principalmente em aplicações industriais de alto custo. Atualmente o fluido erosivo do processo de usinagem por hidroerosão na planta industrial da Robert Bosch em Curitiba é trocado a cada 10 dias. A

partir da utilização do ajuste da viscosidade, o fluido erosivo poderá ser usado por até 30 dias ou mais, o que irá depender de testes de longa duração futuros caso seja decidido pela implementação da presente metodologia.

5. A contaminação do fluido erosivo pelo óleo de exame da estação 1 é responsável por aproximadamente 67,5% da redução da viscosidade do fluido erosivo ao longo de 40 horas de trabalho. A redução de viscosidade gerada pela contaminação por fluido impregnado nas peças após a medição do fluxo volumétrico é inevitável, uma vez que já existe um sistema de sucção do óleo de exame após medição e o tempo de sucção não pode ser aumentado devido ao impacto no tempo de ciclo do processo e consequente perda de produtividade.
6. A partir da análise de espectrometria de massa, obteve-se a confirmação da contaminação do óleo de processo pelo óleo de exame, estando associada a redução da viscosidade do óleo observada no processo, uma vez que o óleo de exame é mais leve, ou seja constituído de compostos de menor massa molar e consequentemente mais voláteis.

## 7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Após a análise dos resultados obtidos para as 160 horas de monitoramento do processo de usinagem por hidroerosão com ajuste de viscosidade e das causas para a redução da viscosidade do fluido erosivo, são apresentadas as seguintes sugestões para dar continuidade ao trabalho:

1. Investigação da quebra das cadeias carbônicas do óleo mineral ao longo do tempo e sua influência na redução da viscosidade do óleo após longo período de utilização.
2. Estudo de monitoramento *online* do processo de hidroerosão para ajuste automático da viscosidade e concentração volumétrica de partículas do fluido erosivo.

## 8 REFERÊNCIAS

- AEBERSOLD, R.; MANN, M. **Mass spectrometry-based proteomics**. Nature. v. 42., p. 198-207, 2003.
- ARAÚJO, M. A. S.; MEHL, A. **Caracterização de produtos de oxidação de óleos lubrificantes**. 5º CONGRESSO LATINO AMERICANO DE HIDROCARBONETOS, 1996, RIO DE JANEIRO, 1996.
- ASTM D2983-09. Standard Test Method for Low-Temperature Viscosity of Lubricants Measured by Brookfield Viscometer.
- ASTM D445-15. Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity).
- ASTM D7152 Standard Practice for Calculating Viscosity of a Blend of Petroleum Products. ASTM Book of Standards, vol.05.04.
- ASTM D341-93. An American National Standard Standard Viscosity-Temperature Charts for Liquid Petroleum Products.
- ASTM E1252-98. Standard Practice for General Techniques for Obtaining Infrared Spectra for Qualitative Analysis.
- BARTZ, W.J. **Lubricants and the environment**. Tribology International, Volume 31, 1998, p. 35 - 47.
- CHIARADIA, Mariza C., COLLINS, Carol H., JARDIM, Isabel C. S. F. **O estado da arte da cromatografia associada à espectrometria de massas na análise de compostos tóxicos em alimentos**. Química Nova, Vol. 31, No. 3, 623-636, 2008.
- COSEGLIO, M. S. D. R., **Análise da eficiência do processo de usinagem por hidroerosão sem renovação de partículas abrasivas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- DIVER, C., ATKINSON, J., BEFRUI, B., HELML, H.J., LI, L. **Improving the geometry and quality of a micro-hole fuel injection nozzle by means of hydroerosive**

**grinding.** Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Volume 221 Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2007, p. 1-9.

ESK, Boletim técnico das partículas abrasivas de Carbetto de Boro, Ed. 03, 2012.

FREITAG, A. **The rise of today's clean diesel vehicles: performance, benefits and market growth.** Diesel Technology forum, Washington, D.C., 2011, p. 1-29.

FREITAS, S. K. B. **Uma metodologia para screening analysis de sucos cítricos utilizando um analisador automático em fluxo-batelada, espectrometria UV-VIS e técnicas quimiométricas.** Dissertação (Mestrado em Química) – Curso de Pós Graduação em Química, Universidade Federal da Paraíba, 2006.

GAO, Y., LI, K. **New models for calculating the viscosity of mixed oil.** Fuel, Volume 95, 2012, p. 431 - 437.

GROSS, J. H. **Mass spectrometry: a textbook.** Heidelberg, Germany: Springer Verlag, 2004, p. 518.

HUMPHREY, J. **Fundamentals of fluid motion in erosion by solid particle impact.** International Journal of Heat and Fluid Flow, Volume 11, No. 3, 1990, p. 170-195.

ISO 3448:1992. Industrial liquid lubricants -- ISO viscosity classification

KOH, S.C., BUTT, B.J. **Experimental and Modeling Study of Kinetics and Selectivity in the Oxidation of a Poly( $\alpha$ -olefin) Lubricant.** Ind. Eng. Chem. Volume 34, 1995, p. 354 - 535.

NETO, J. G. V., **Um espectrômetro microcontrolado baseado em LED branco como fonte de radiação e mídia de CD como grade de difração.** Tese (Doutorado em Química) – Curso de Pós Graduação em Química, Universidade Federal da Paraíba, 2008.

PAYRI, R, GARCÍA, J.M., SALVADOR, F.J., GIMENO, J. **Using spray momentum flux measurements to understand the influence of diesel nozzle geometry on spray characteristics.** Fuel, Volume 84, 2005, p. 551–561.

PEKER, S. HELVACI, S. **Solid-Liquid Two Phase Flow**. Elsevier Science; 1 edition, 2008. PDF file available from <http://www.sciencedirect.com>.

POTZ, D., CHRIST, W., DITTUS, B. **Diesel Nozzle – The determining interface between injection system and combustion chamber**. Proceedings of Thiesel Conference, Valência, Espanha, 2000, p. 133 - 138.

RUBIO, S.M., CASTILLO, C.F., AQUINO, R.F., ROMERO, L.J. **A new focus on the Walther equation for lubricant viscosity determination**. Lubrication Science, Volume 18, 2006, p. 95 - 107.

SKOOG, D.A., HOLLER, F.J., NIEMAN, T.A. **Princípios de Análise Instrumental**. 5. ed. Rio de Janeiro: Bookman, 2002.

SPEIGHT, J. G. **Handbook of petroleum analysis**. Editora Wiley-Interscience, United States of America, 2001, p. 512.

SOLEIMANIA, M., SOPHOCLEOUS, M., WANG, L., ATKINSON, J., HOSIER, L.I., VAUGHAN, S.A., TAYLOR, I. R., WOOD, K.J.R. **Base oil oxidation detection using novel chemical sensors and impedance spectroscopy measurements**. Sensors and Actuators, Volume B 199, 2014, p. 247 - 258.

STACHOWIAK, G.W., BATCHELOR, A.W. **Engineering Tribology**. 1993.

VOORT, V.D.F.R., SEDMAN, J., PINCHUK, D. **An Overview of Progress and New Developments in FTIR Lubricant Condition Monitoring Methodology**. Journal of ASTM International, Volume 8, No. 5, 2011, Paper ID JAI103344.

Zeller&GMELLIN, Boletim técnico dos óleos de processo e correção, Ed. 4, 2013.

WEICKERT, M., SOMMERFELD, M., TEIKE, G., IBEN, U. **Experimental and numerical investigation of the hydroerosive grinding**. Powder Technology, Volume 214, 2011, p. 1-13.

WU, Y., LI, W., ZHANG, M., WANG, X. **Oxidative degradation of synthetic ester and its influence on tribological behavior**. Tribology International, Volume 64, 2013, p. 16 - 23.

## APÊNDICE A – COBEF 2013




 COMPROMETIDA COM A PROMOÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DA ENGENHARIA E DAS CIÊNCIAS MECÂNICAS  
**7º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**  
**7<sup>th</sup> BRAZILIAN CONGRESS ON MANUFACTURING ENGINEERING**  
 20 a 24 de maio de 2013 – Penedo, Itatiaia – RJ - Brasil  
 May 20<sup>th</sup> to 24<sup>th</sup>, 2013 – Penedo, Itatiaia – RJ – Brazil

### EFEITO DAS PROPRIEDADES DO FLUIDO EROSIVO NO PROCESSO DE HIDROEROSÃO

Elis Marina Schvan Wendt, [elismarina@hotmail.com](mailto:elismarina@hotmail.com)<sup>1</sup>  
 Pamela Portela Moreira, [pamela.moreira@br.bosch.com](mailto:pamela.moreira@br.bosch.com)<sup>2</sup>  
 Mario Coseglio, [mariocoseglio@hotmail.com](mailto:mariocoseglio@hotmail.com)<sup>1</sup>  
 Giuseppe Pintaúde, [pintaude@utfpr.edu.br](mailto:pintaude@utfpr.edu.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Av. Sete de Setembro, 3165, CEP: 80230-901, Curitiba, Brasil

<sup>2</sup>Robert Bosch Ltda, Av. Juscelino K Oliveira, 11800 - Cidade Industrial Curitiba - PR, 81020-490

**Resumo:** O processo de usinagem por hidroerosão consiste na passagem de um fluido erosivo, a altas pressões, no interior de canais internos de difícil acesso de componentes mecânicos. O meio erosivo é constituído por partículas abrasivas suspensas em um fluido. As partículas são lançadas contra a superfície provocando a remoção de material pelo impacto sucessivo a altas velocidades, sendo mais pronunciado em regiões em que ocorrem mudanças de direções ou transições abruptas do escoamento. A indústria automotiva pode ser considerada a grande usuária deste tipo de processo de fabricação. Neste trabalho são apresentadas as principais variáveis que constituem o processo, bem como os seus efeitos na eficiência da remoção de material. A caracterização de partículas também é discutida, uma vez que o efeito das mesmas nas propriedades do fluido afeta sobremaneira o processo. Por fim, os desafios atuais sob o ponto de vista industrial são apresentados, assim como as perspectivas de trabalhos futuros na área.

**Palavras-chave:** hidroerosão, geometria de partículas, erosão

#### 1. INTRODUÇÃO

Diversas indústrias como a aeroespacial, automotiva e de moldes e ferramentas apresentam componentes mecânicos submetidos a condições severas de pressões e temperaturas. Para obtenção de geometrias favoráveis para o aumento do desempenho, confiabilidade e durabilidade de componentes críticos em determinadas condições de operação, processos não convencionais de usinagem que envolvem o escoamento de um fluido erosivo são frequentemente utilizados. A redução da rugosidade superficial e arredondamento de transições internas podem evitar falhas por fadiga e minimizar as perdas de carga.

Um exemplo típico da indústria automotiva é o processo de arredondamento de canais internos de componentes do sistema de injeção de motores a diesel. Neste caso o arredondamento das entradas dos canais de injeção tem como objetivo aumentar do fluxo interno e reduzir as perdas de carga localizadas. De acordo com Winter et al (2005), a geometria dos canais de injeção de motores diesel influencia diretamente a geometria e estabilidade do jato de combustível, o que resulta em melhores condições de descarga. Consequentemente, o formato do canal de injeção é um dos fatores dominantes na determinação dos níveis de emissões do sistema. Os canais, caracterizados por apresentarem alta razão de aspecto e diâmetros de 100µm a 200µm, são geralmente obtidos pelo processo de eletroerosão a fio. Posteriormente são submetidos a uma operação de acabamento pelo processo de hidroerosão, que consiste na remoção de material pela passagem de um fluido erosivo (Potz et al, 2000). A mistura, composta por uma fase líquida contínua e uma fase sólida dispersa, escoam através da contração e promove a remoção de rebarbas e posterior arredondamento devido ao impacto dos erodentes a altas velocidades.

O tempo de processamento da hidroerosão depende de inúmeros fatores como dureza, tamanho e geometria dos erodentes. Apesar de muitos trabalhos publicados reconhecerem a importância da influência do comportamento hidrodinâmico da fase fluida no processo de remoção por escoamento bifásico, muitos trabalhos continuam avaliando os mecanismos de desgaste quase exclusivamente em função das propriedades mecânicas dos sólidos e da superfície atingida (Humphrey, 1990). No presente trabalho serão apresentadas as principais variáveis que definem a capacidade de remoção de material, como a diferença de pressão aplicada, as propriedades do fluido, a concentração volumétrica da fase sólida, a distribuição de tamanho e, finalmente, a geometria das partículas suspensas. Um estudo de caso é apresentado com objetivo de avaliar como as variáveis do processo podem influenciar a produtividade do processo de hidroerosão.

## 2. PROCESSO DE HIDROEROSÃO

O processo de hidroerosão (HE) consiste no arredondamento da região de entrada de transições abruptas de escoamento através da passagem de um fluido contendo partículas em suspensão, tipicamente aplicado em micro canais com diâmetros entre 100µm e 200µm obtidos pelo processo de eletroerosão (Diver, 2006). O objetivo do processo é a remoção de rebarbas e diminuição da rugosidade superficial para evitar perdas de cargas excessivas na região de transição. O resultado é esquematicamente ilustrado na Fig. (1). O principal efeito do arredondamento é o aumento do fluxo volumétrico no interior do componente. Como a região de transição sofrerá desgaste natural devido aos esforços do escoamento do óleo diesel quando o componente estiver em operação, o processo tem o objetivo adicional de calibrar o sistema e prevenir futuros erros de medição para o sistema de injeção a diesel, por exemplo.

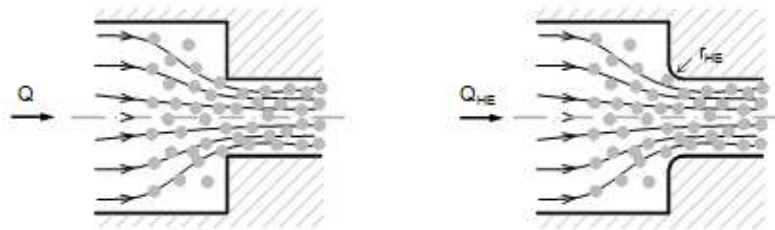


Figura 1. Esquema do arredondamento em uma transição abrupta (a) antes do HE e (b) após HE

O material é removido até que o aumento percentual do fluxo, HE%, atinja o valor especificado em projeto, conforme indicado na Eq. (1), em que  $Q$  e  $Q_{HE}$  representam o fluxo volumétrico antes e depois do arredondamento, respectivamente.

$$HE \% = \frac{Q_{HE} - Q}{Q} \quad (1)$$

O método de controle consiste no monitoramento do fluxo volumétrico, até que seja atingido o valor especificado. O diagrama simplificado do processo é esquematicamente ilustrado na Fig. (2). Um dos principais parâmetros que influenciam fortemente a velocidade de incremento de fluxo é a pressão diferencial aplicada, geralmente em torno de 100 a 200 bar.

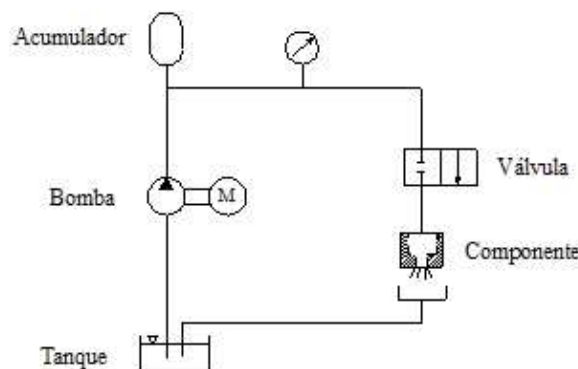


Figura 2 - Esquema do processo de hidroerosão

De acordo com Potz et al (2000), o processo HE pode ser dividido em quatro fases principais, conforme ilustrado na Fig. (3). O efeito geométrico é representado como função do tempo de arredondamento e um parâmetro de desempenho da peça é utilizado para determinar o limite de material a ser removido para que seja atingida a geometria desejada que corresponda ao fluxo especificado. Na primeira fase a geometria da entrada do furo é alterada formando um raio favorável para o escoamento e que resulta em uma elevação rápida do parâmetro de desempenho, que está parcialmente associado ao aumento do fluxo. Na Fase 2 a rugosidade da superfície interna é reduzida e o diâmetro



interno aumenta sensivelmente (Fase 3), sem efeito pronunciado no desempenho. A etapa posterior (Fase 4) deve ser evitada porque o aumento adicional do diâmetro resulta em efeito negativo para o processo. O tempo de ciclo do processo está associado à taxa de remoção de material, que depende de inúmeros fatores como dureza, tamanho e geometria dos abrasivos, viscosidade do fluido, pressão, concentração volumétrica da fase sólida, entre outras características do escoamento e propriedades do material da peça submetida ao processo.

Para elevados tempos de produção é observado um aumento do tempo de ciclo que pode ser associado à perda de capacidade de remoção do fluido erosivo. A taxa de remoção pode ser avaliada pela relação entre a variação percentual do fluxo volumétrico e o tempo necessário para atingir a condição especificada, conforme indicado na Eq. (2), em que  $t_{HE}$  é o tempo de usinagem de um componente.

$$\dot{E} = \frac{HE\%}{t_{HE}} \quad (2)$$

A perda da capacidade de remoção pode ser associada à soma de efeitos da perda da eficiência de corte da fase sólida e alterações de propriedades físico-químicas do fluido. Para que o tempo de ciclo não ultrapasse o tempo limite determinado pela condição de produtividade planejada para o processo, novos abrasivos são adicionados periodicamente ao sistema. A quantidade e frequência de adições definem o consumo de abrasivos para o processo HE e devem ser planejados para que o custo da operação seja minimizado.

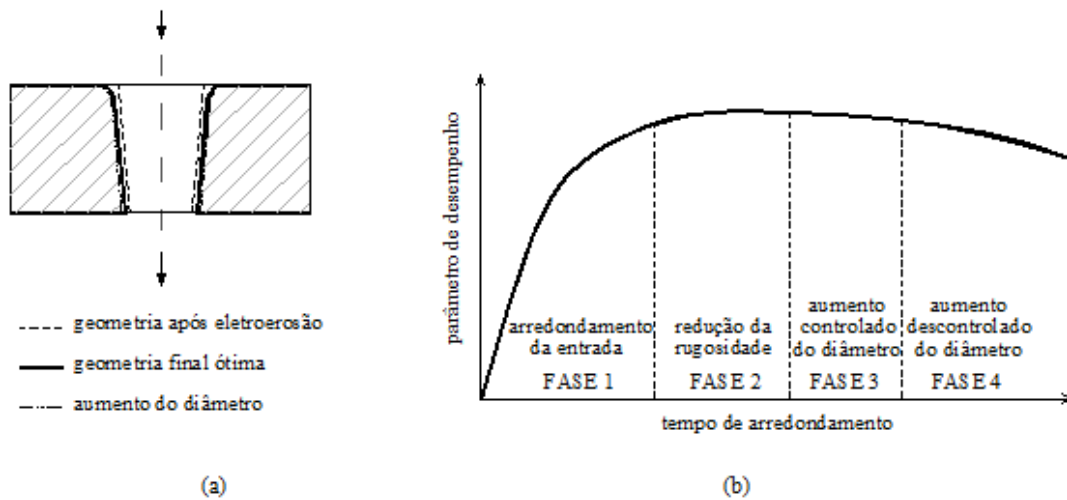


Figura 3 - (a) Esquema da evolução da geometria durante o processo HE e (b) principais etapas do processo HE (Adaptado de Potz et al, 2000)

### 2.1. Caracterização da fase sólida

As principais características da fase sólida que influenciam a capacidade de remoção de material são o tamanho e a geometria dos erodentes. Dos modelos de erosão de Finnie (1960) e Bitter (1963), a quantidade de material removido da superfície atingida é diretamente proporcional à massa de partículas incidentes. Ensaios de laboratório indicam padrões consistentes da influência do tamanho dos erodentes no processo de hidroerosão, sendo que sólidos suspensos com tamanhos médios maiores são mais favoráveis para a remoção, dada uma mesma concentração.

O tamanho pode ser caracterizado através do diâmetro médio das partículas ou pela distribuição granulométrica, utilizando como referências os parâmetros estatísticos  $d_{10}$ ,  $d_{50}$  e  $d_{90}$ .

Erodentes com mesmo tamanho podem apresentar resultados diferentes devido a variações nos seus formatos. Comparando uma partícula de geometria angulosa com uma idealmente esférica, haverá uma tendência de o raio efetivo de contato ser menor para o erosivo irregular submetido às mesmas condições de carregamento. Assim, maior energia cinética será transferida por unidade de área, resultando em maior densidade de energia disponível para a deformação da superfície. Outro aspecto que evidencia a importância da geometria é o ângulo de ataque medido a partir da superfície atingida até a direção de incidência do abrasivo. Para baixos ângulos a remoção é favorecida devido à predominância do mecanismo de microcorte e seu efeito é pronunciado quando a partícula apresenta geometria angulosa.

## 2.2. Caracterização do fluido

A viscosidade e a densidade são os principais parâmetros utilizados para avaliar o comportamento de escoamentos bifásicos. A densidade da mistura,  $\rho_m$ , é definida em termos da concentração volumétrica de sólidos  $\phi$  e a massa específica da partícula e do líquido,  $\rho_p$  e  $\rho_f$ , respectivamente, conforme indicado na Eq. (3).

$$\rho_m = \phi\rho_p + (1 - \phi)\rho_f \quad (3)$$

De acordo com Senapati et al (2009), Einstein propôs em 1906 um modelo para determinar a viscosidade de misturas de fluidos com partículas sólidas. Neste modelo foram consideradas partículas esféricas com baixa concentração volumétrica ( $<0,01$ ), de modo que as interações entre as partículas podem ser desprezadas. A viscosidade relativa  $\mu_r$ , definida como a razão entre a viscosidade da mistura  $\mu_m$  e do fluido  $\mu_f$ , aumenta com o aumento da fração volumétrica da fase sólida  $\phi$ , conforme pode ser observado na Eq. (4), em que  $[\mu]$  é definido como viscosidade intrínseca e para este caso específico corresponde a 0,25.

$$\mu_r = (1 + [\mu]\phi) \quad (4)$$

Diversas adaptações têm sido sugeridas para estender a relação entre concentração e viscosidade para moderadas e altas concentrações. Segundo Senapati et al (2009) o aumento da concentração diminui a distância média  $d_m$  entre as partículas e conseqüentemente ocorrem mais colisões (se  $d_m \rightarrow 0$  então  $\mu_r \rightarrow \infty$ ). Para limitar o teórico aumento indefinido da viscosidade, a concentração volumétrica máxima  $\phi_m$  é determinada considerando o limite em que  $1/\mu_r \rightarrow 0$ , conforme ilustrado na Fig. (4a). A influência do tamanho também pode ser observada, sendo  $d_{50(1)} > d_{50(2)} > d_{50(3)}$ . Para uma mesma concentração volumétrica a viscosidade relativa diminui conforme a partícula aumenta de tamanho. Isto pode ser explicado pela redução das interações partícula-partícula devido ao aumento do espaçamento médio.

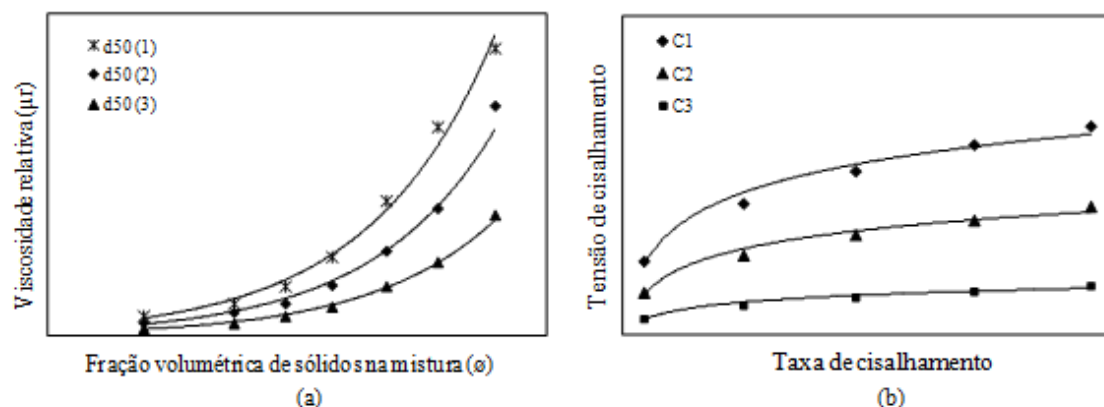


Figura 4 - Concentração volumétrica máxima (Adaptado de Senapati et al, 2009)

Senapati et al (2009) propôs um modelo baseado em resultados experimentais da viscosidade de misturas com diferentes concentrações ( $C_1 > C_2 > C_3$ ). Conforme pode ser observado na Fig. (4b) a viscosidade foi mais elevada para maiores concentrações e a taxa de variação da tensão de cisalhamento em relação à da taxa de cisalhamento  $\dot{\gamma}$  não foi constante, caracterizando comportamento de fluido não newtoniano. A forma empírica obtida para determinação da viscosidade relativa é dada pela Eq. (5), sendo  $C_s$  o coeficiente de uniformidade de tamanho.

$$\mu_r = 10 \frac{C_s}{d_{50}} \left[ 1 + \frac{[\mu]}{\dot{\gamma}} \left( \frac{\phi}{\phi_m - \phi} \right) \right] \quad (5)$$

É importante notar que, à medida que a concentração diminui, a mistura passa a ter um comportamento que pode ser aproximado como o de um fluido Newtoniano, com viscosidade constante e independente da taxa de cisalhamento aplicada. Para altas taxas a relação entre a tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento complementa a justificativa para esta aproximação.

Segundo Rani et al (2004), um fator importante para determinação do método para descrição do escoamento é resposta da partícula sólida para uma determinada variação no escoamento do fluido. O tempo de relaxação,  $t_{pr}$ ,

indicado na Eq. (6) é definido em termos da velocidade  $V_p$ , diâmetro  $d_p$ , densidade  $\rho_p$  e do coeficiente de arrasto da partícula,  $C_D$ .

$$t_{sv} = \left(\frac{4}{3}\right) \left(\frac{\rho_p}{\rho_f}\right) \frac{d_p}{C_D V_p} \quad (6)$$

A razão entre o tempo de relaxação e o tempo característico do sistema  $t_c$  é conhecido como número de Stokes,  $S_i$ . O tempo característico é o tempo que o líquido leva para escoar por um determinado sistema. De acordo com Weickert et al (2011) o número de Stokes pode ser utilizado para quantificar o quanto o movimento da partícula está acoplado com o movimento do fluido. Quando  $S_i < 1$  a partícula sólida responde rapidamente ao movimento do fluido e na maioria dos casos segue a linha de corrente do escoamento. Como pode ser observado nas Eq. (6) e Eq. (7), conforme a densidade  $\rho_p$  e diâmetro da partícula  $d_p$  aumentam, a fase sólida tende a se desprender do fluido devido ao aumento do valor do número de Stokes. O mesmo efeito é esperado quando a velocidade média do escoamento aumenta ou a viscosidade do fluido  $\mu_f$  diminui. Neste caso, o número de Reynolds se torna mais elevado e o coeficiente de arrasto é reduzido, provocando aumento do tempo de relaxação e, conseqüentemente, do número de Stokes.

$$S_i = \frac{t_{sv}}{t_c} \quad (7)$$

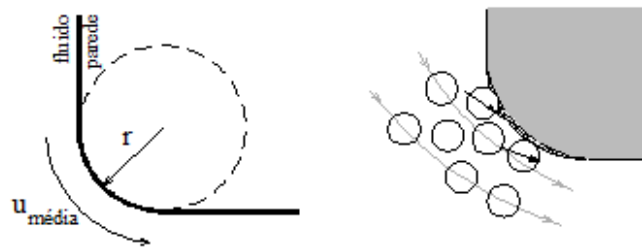


Figura 5 - Ilustração do movimento da partícula na região arredondada e condição de impacto na parede

A falta de acoplamento das partículas sólidas com o fluido pode ter efeito positivo para o aumento da erosão. Como as partículas estão menos acopladas, estão mais suscetíveis a serem lançadas contra a região da entrada do canal, conforme ilustrado esquematicamente na Figura 5

### 3. ESTUDO DE CASO

Um estudo de caso foi realizado em uma indústria do setor metal - mecânico da Cidade Industrial de Curitiba que utiliza o processo de hidroerosão para arredondamento da região de entrada de canais internos de bicos injetores de sistemas a diesel. O fluido erosivo consiste na mistura de partículas de carbeto de boro (B4C) e óleo lubrificante mineral. O objetivo do estudo consiste em avaliar o efeito das propriedades da partícula e do fluido no tempo de ciclo do processo, que está relacionado com a velocidade com que o material é removido para formar o arredondamento na região de entrada do canal. Adicionalmente, o estudo tem como objetivo estabelecer padrões consistentes de realimentação de sólidos na mistura e, desta forma, evitar a adição aleatória de abrasivos.

#### 3.1. Capacidade de remoção

A capacidade de remoção,  $E$ , é considerada como sendo a razão entre o aumento porcentual do fluxo, Eq. (1), e o tempo de arredondamento  $t_{HE}$ . Em termos destas variáveis, a capacidade de remoção para um determinado intervalo  $j$  é definida conforme indicado na Eq. (8), sendo  $n$  o número de itens produzidos no intervalo e  $i$  representa cada um dos  $n$  injetores.

$$\bar{E}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{HE\%}{t_{HE}} \right)_i \quad (8)$$

Como no equipamento selecionado para análise são produzidos diversos itens da mesma família de injetores com pequenas variações de ângulos internos, quantidade de canais e especificações de fluxo, um mesmo componente foi selecionado para que a geometria interna não fosse uma variável adicional. A perda de capacidade de remoção foi avaliada através do monitoramento de quatro lotes deste componente produzidos em quatro intervalos distintos durante



um período de aproximadamente 55 horas de produção. Neste período não houve adição de abrasivos. Foi conveniado tempo zero para o início do primeiro lote avaliado (lote I), que teve duração de 1,6 horas. O mesmo bico injetor iniciou a ser produzido novamente após 3,5 horas de produção (lote II), permanecendo em produção por 3,9 horas. Os lotes III e IV iniciaram quando decorridos 8 e 53,5 horas, respectivamente. O valor médio da taxa de remoção  $E_j$  para cada lote (I a IV) não consecutivo de  $n$  unidades foi determinado pela Eq. (8). Durante o período, cinco amostras (H1 a H5) do fluido erosivo foram coletadas quando decorridos 7h, 19h, 31h, 39h e 51h de produção, conforme ilustrado esquematicamente na Fig. (6).

Conforme pode ser observado na Fig. (6) houve redução significativa da capacidade de remoção do fluido abrasivo. Após 55 horas de uso a capacidade foi reduzida em mais de 50%. A redução da capacidade de remoção pode ser resultado do efeito combinado das alterações de tamanho e geometria dos abrasivos, bem como das propriedades do óleo durante o processo. Os resultados dos ensaios para cada parâmetro são apresentados nos itens 3.2 a 3.3. A primeira etapa consistiu na medição da viscosidade do óleo filtrado e da mistura (óleo com abrasivos), seguida pela caracterização do tamanho e geometria dos abrasivos. Finalmente, a degradação do óleo foi avaliada.

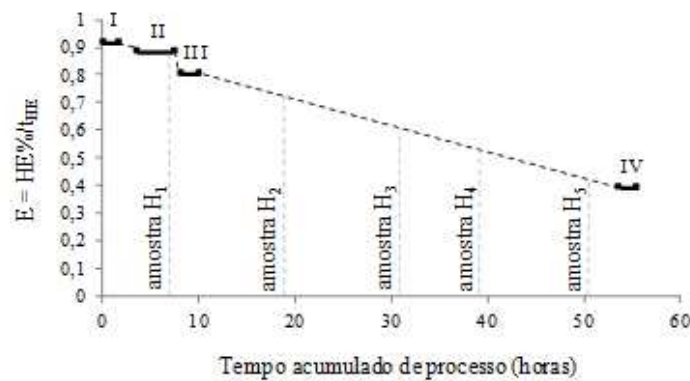


Figura 6 – Resultados da taxa de remoção para produção de um mesmo componente para mistura com concentração volumétrica constante de abrasivos

### 3.2. Viscosidades do óleo e da mistura

O fluido utilizado no processo de hidroerosão consiste em um óleo de base mineral composto de hidrocarbonetos, aditivos antidesgaste, antiespumante, antioxidante e óleo básico aumentador de índice de viscosidade. A viscosidade da mistura foi obtida utilizando um viscosímetro rotativo de cilindros coaxiais do tipo taxa controlada e sensor tipo Searle. Inicialmente a viscosidade de cada amostra foi determinada variando a taxa de cisalhamento.

Primeiramente a natureza do escoamento foi determinada através das curvas de viscosidade e de fluxo do fluido erosivo, indicadas na Fig. (7a) e Fig. (7b), respectivamente. A temperatura foi mantida constante e igual a 30°C. A concentração de sólidos durante os ensaios foi de 22,5 gramas de abrasivos por litro de óleo. A viscosidade permaneceu constante para taxas de cisalhamento superiores a  $10s^{-1}$  e o fluido pode ser considerado Newtoniano nesta faixa.

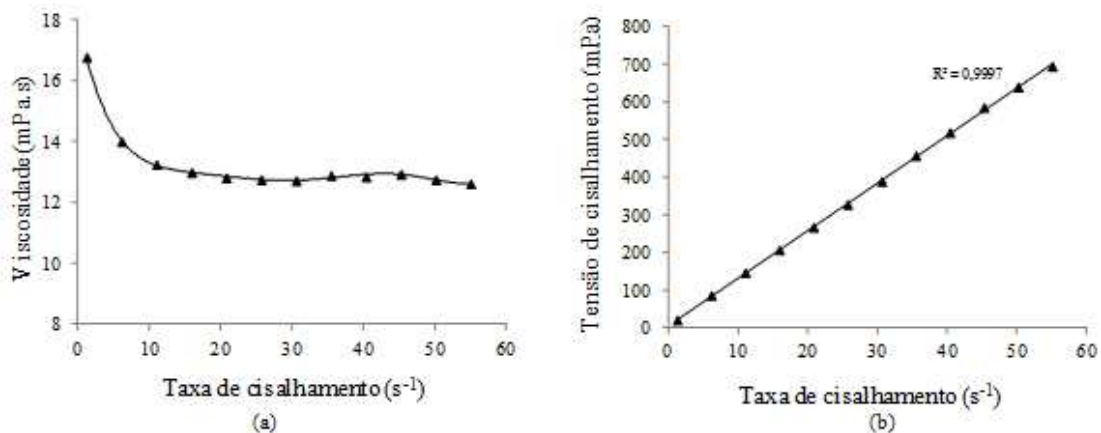


Figura 7 - Resultados da viscosidade da mistura e do óleo filtrado

Para medição da viscosidade do óleo, a mistura foi filtrada utilizando uma membrana de celulose com o auxílio de uma bomba a vácuo. A viscosidade cinemática foi obtida com a utilização de um viscosímetro capilar. Todas as medições foram realizadas a uma temperatura de 30°C e a temperatura ambiente do laboratório foi mantida em 25°C durante todo o ensaio. Os resultados estão indicados na Fig. (8). No período analisado foi observada uma redução de aproximadamente 8% tanto para a viscosidade da mistura como para o óleo filtrado.

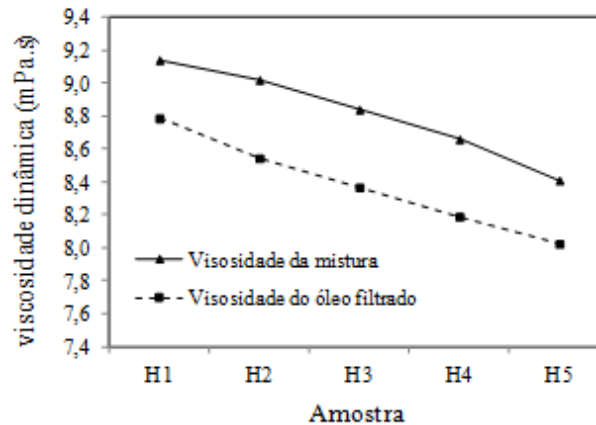


Figura 8 – Resultados da viscosidade da mistura e do óleo filtrado

### 3.3. Tamanho e geometria dos abrasivos

Para avaliação do tamanho, as cinco amostras de 250 ml foram coletadas (H1, H2, H3, H4 e H5). Durante o período, mais de um tipo de componente foi produzido, porém nenhum abrasivo foi adicionado no intervalo analisado, mantendo a concentração volumétrica praticamente constante de 1%. O tamanho foi caracterizado pela distribuição granulométrica dos abrasivos com a utilização de um granulômetro por dispersão a laser CILAS 1064 com limites de detecção entre 0,04 a 500µm. Os resultados estão apresentados na Fig. (9) para as amostras no início (H1) e no final do período (H5). A distribuição de tamanho para as duas amostras foi de 0,20 µm a 17,00 µm. Os parâmetros estatísticos  $d_{10}$ ,  $d_{50}$  e  $d_{90}$  reduziram 5%, 2% e 1%, respectivamente, do início até o final do período analisado. Também pode ser observada uma redução da moda para a amostra H5, o que indica que a fração das partículas maiores foi reduzida após o período analisado.

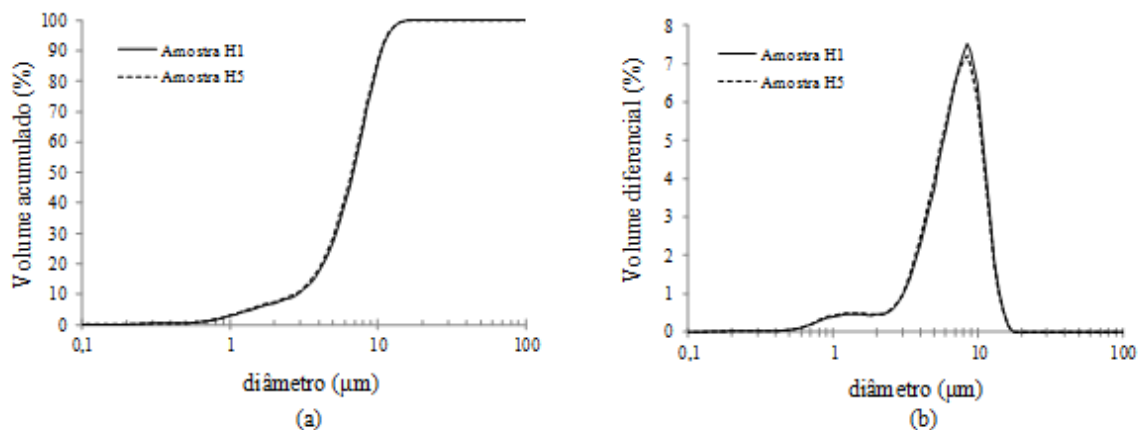


Figura 9 – Resultados da distribuição de tamanho para o Caso 2: (a) volume acumulado (b) volume diferencial

Nas Fig. (10a) e Fig. (10b) são apresentadas as imagens das amostras H1 e H5, respectivamente. As imagens, obtidas no microscópio eletrônico de varredura, foram utilizadas para analisar o efeito da geometria dos abrasivos. Considerando que neste período a concentração volumétrica dos abrasivos permaneceu praticamente constante, era esperado que após o período de 55 horas as partículas apresentassem uma forma menos angulosa, caracterizada por

cantos arredondados. Este fenômeno, que seria resultado do impacto dos abrasivos na região de entrada do furo a altas pressões, não foi evidenciado com a análise qualitativa das imagens.

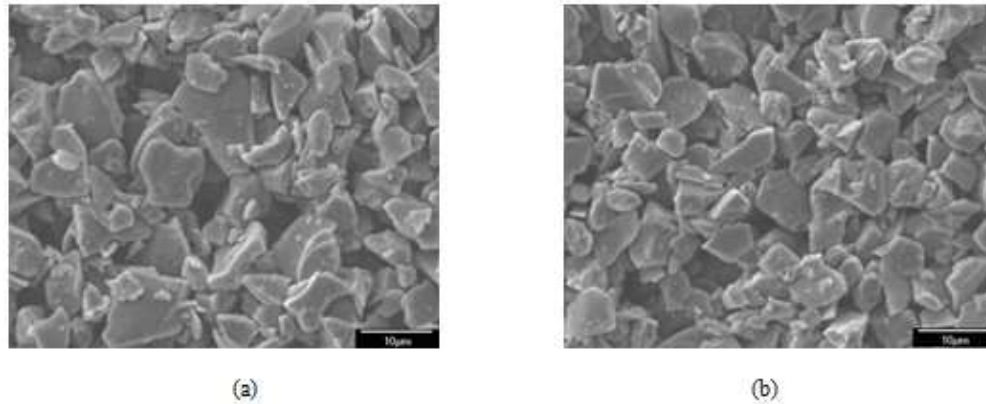


Figura 10 – Imagem MEV dos abrasivos (a) amostra H1 e (b) amostra H5

### 3.4. Caracterização do óleo

Como não houve alteração significativa do tamanho do abrasivo para justificar a alteração da viscosidade da mistura, foi realizada também uma análise de degradação do óleo utilizando Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) de três amostras (óleo novo, H2 e H4). O resultado da análise está indicado na Fig. (11). Observando o número de onda e a transmitância encontrada, verificou-se que as bandas A são características de hidrocarbonetos presentes no óleo mineral, a banda B é característica do gás carbônico presente no ambiente e essa variação de intensidades não tem relação com a amostra analisada. A banda C é característica do grupo funcional OH presente em álcool, fenol, enol e ácido carboxílico e é um indicativo que uma pequena fração do óleo tenha sofrido degradação (oxidação).

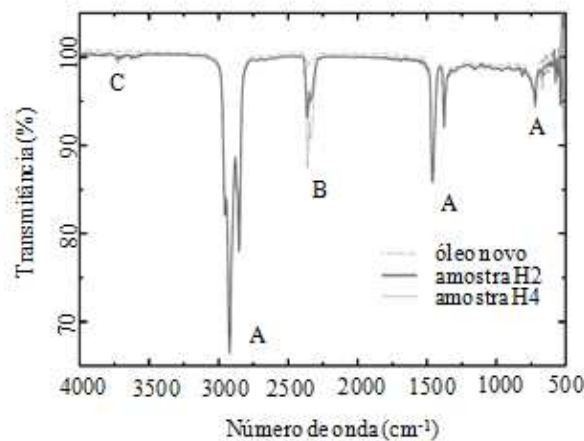


Figura 11 – Resultados da análise FTIR para as amostras de óleo novo, amostra H2 e amostra H4

## 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho apresentou uma revisão do processo de hidroerosão e uma discussão a respeito das principais variáveis do processo. De acordo com a revisão da literatura, o tamanho, a geometria e concentração volumétrica da fase sólida influenciam diretamente a capacidade de remoção. A viscosidade e a densidade do fluido erosivo são também considerados importantes para definir a natureza do escoamento e, conseqüentemente, a interação do particulado com a parede do canal.

Do estudo de caso pode ser concluído que o fluido erosivo tem sua eficiência de remoção reduzida com o aumento do tempo de processamento. A partir dos resultados da distribuição de tamanho e geometria dos abrasivos, uma redução



7º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO 20 a 24 de Maio de 2013. Penedo, Itaitiá - RJ

pouco significativa de tamanho e nenhuma alteração expressiva de geometria foi observada, o que indica que nenhuma destas variáveis contribuiu para a redução da capacidade de remoção no período observado.

A viscosidade do fluido erosivo reduziu em torno de 8% e o mesmo efeito foi observado para o óleo filtrado. Uma parcela da redução pode ter sido resultante da oxidação do óleo, porém novos ensaios devem ser conduzidos para avaliar o efeito de outras variáveis. Ao contrário do esperado pela teoria, a redução da viscosidade foi desfavorável para a capacidade de remoção.

Apesar de não terem sido adicionados abrasivos durante o intervalo avaliado, a concentração de sólidos pode ter sido alterada devido à perda acumulada de partículas detectadas no processo de limpeza dos bicos injetores após o processo de hidroerosão. Uma parcela das partículas adere às paredes internas do canal e não retorna para o circuito. Novos ensaios devem ser conduzidos para quantificar a massa perdida, que resulta na redução da concentração de abrasivos no circuito. E esperado que esta redução contribua para a redução da eficiência do fluido erosivo.

Finalmente, uma amostragem maior é recomendada para a caracterização das partículas e do fluido para justificar a elevada redução da capacidade após longo período de produção. Neste caso a amostragem pode ter sido pequena quando comparada com a população total de partículas.

## 5. REFERÊNCIAS

- Bitter, J.G.A, 1963. A study of erosion phenomena (part 1), *Journal of Wear* 6 5–21
- Bitter, J.G.A, 1963. A study of erosion phenomena (part 2), *Journal of Wear* 6 169–190
- Diver, C., 2006, "Improving the geometry and quality of a micro-hole fuel injection nozzle by means of hydroerosive grinding", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 2007 221: 1
- Finnie, I, 1960. Erosion of surfaces by solid particles. *Wear*, 3 (1960) 87-103.
- Hamblin, M.G. and Stachowiak, G.W., 1996, "Description of Abrasive Particle Shape and Its Relation to Two-Body Abrasive Wear", *Tribology Transactions*, V39, p. 803-810, 1996.
- Humphrey, J.A.C, 1990. Fundamentals of fluid motion in erosion by solid particle impact. *International J. Heat and Fluid Flow*, Vol 11, N° 3. Butterworth-Heinemann.
- Potz, D et al, 2000, "Diesel Nozzle – The Determining Interface Between Injection System and Combustion Chamber", *Thiesel Conference*, Valência, Espanha, pp. 133-138.
- Rani, S.L. et al, 2004. Numerical simulations of turbulence modulation by dense particles in a fully developed pipe flow. *Powder Technology*, 141, 80-99.
- Senapati, P.K. et al, 2009, "Modeling of viscosity for power plant ash slurry at higher concentrations: Effect of solids volume fraction, particle size and hydrodynamic interactions", *Powder Technology*, Vol. 197, pp. 1-8.
- Weickert, M., 2011, "Experimental and numerical investigation of the hydroerosive grinding", *Powder Technology*, Vol. 214, pp. 1-13.
- Winter, J. et al, 2005. Nozzle hole geometry – A powerful instrument of advanced spray design. Robert BOSCH GmbH.

## 6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

## APÊNDICE B – RESULTADOS DE VISCOSIDADE DINÂMICA DAS AMOSTRAS

Tabela 0.1 - Viscosidades dinâmicas das amostras A1 a A19 do óleo filtrado

<b>Amostra</b>	<b>Tempo acumulado (horas)</b>	<b>Viscosidade dinâmica a 25°C (mPa.s)</b>
A1	0,00	55,93
A2	21,02	46,84
A3	26,94	46,45
A4	27,07	53,77
A5	54,65	48,14
A6	57,13	46,41
A7	67,67	44,9
A8	67,67	53,23
A9	75,55	51,07
A10	86,17	48,64
A11	90,50	46,31
A12	101,18	43,24
A13	101,28	52,73
A14	119,68	47,51
A15	143,10	41,56
A16	159,83	41,18
A17	159,99	51,02



## APÊNDICE C – TABELA DE REFERÊNCIA PARA AJUSTE DA VISCOSIDADE DO FLUIDO EROSIVO

Tabela 0.2 - Referência para ajuste da Viscosidade (Fonte: Zeller Gmellin, 2014)

Viscosidade Inicial a 40°C (mm <sup>2</sup> /s)	Viscosidade Inicial a 25°C (mm <sup>2</sup> /s)	Viscosidade Inicial a 25°C (mPa*s)	Dosagem do Óleo de Correção (%)	Ajuste para 32 mm <sup>2</sup> /s a 40°C	Ajuste para 66 mm <sup>2</sup> /s a 25°C	Ajuste para 57,0 mPa*s a 25°C
20,0	37,7	32,6	38,4	32,0	66,0	57,0
20,5	38,9	33,6	37,1	32,0	66,0	57,0
21,0	40,0	34,6	35,9	32,0	66,0	57,0
21,5	41,1	35,5	34,5	32,0	66,0	57,0
22,0	42,1	36,4	33,2	32,0	66,0	57,0
22,5	43,3	37,4	31,9	32,0	66,0	57,0
23,0	44,5	38,4	30,5	32,0	66,0	57,0
23,5	45,6	39,4	29,1	32,0	66,0	57,0
24,0	46,8	40,4	27,6	32,0	66,0	57,0
24,5	48,0	41,5	26,2	32,0	66,0	57,0
25,0	49,2	42,5	25,0	32,0	66,0	57,0
25,5	50,4	43,5	23,0	32,0	66,0	57,0
26,0	51,6	44,6	21,5	32,0	66,0	57,0
26,5	52,8	45,6	20,0	32,0	66,0	57,0
27,0	54,0	46,7	18,4	32,0	66,0	57,0
27,5	55,2	47,7	16,7	32,0	66,0	57,0
28,0	56,4	48,7	15,0	32,0	66,0	57,0
28,5	57,6	49,8	13,3	32,0	66,0	57,0
29,0	58,8	50,8	11,6	32,0	66,0	57,0
29,5	60,0	51,8	9,7	32,0	66,0	57,0
30,0	61,2	52,9	7,9	32,0	66,0	57,0
30,5	62,4	53,9	6,0	32,0	66,0	57,0
31,0	63,6	55,0	4,0	32,0	66,0	57,0
31,5	64,8	56,0	2,0	32,0	66,0	57,0