

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FELIPPE PELLEGRINO DE OLIVEIRA

**ESTUDO DE DIÁLISE ONLINE DE ÓLEO HIDRÁULICO DE ESCAVADEIRA POR  
MEIO DE MONITORAMENTO DE NÍVEL DE CONTAMINAÇÃO**

JUIZ DE FORA

2016

FELIPPE PELLEGRINO DE OLIVEIRA

**ESTUDO DE DIÁLISE ONLINE DE ÓLEO HIDRÁULICO DE ESCAVADEIRA POR  
MEIO DE MONITORAMENTO DE NÍVEL DE CONTAMINAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Professor Dr. Carlos Renato Pagotto

JUIZ DE FORA

2016

FELIPPE PELLEGRINO DE OLIVEIRA

**ESTUDO DE DIÁLISE ONLINE DE ÓLEO HIDRÁULICO DE ESCAVADEIRA POR  
MEIO DE MONITORAMENTO DE NÍVEL DE CONTAMINAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovada em 17 de fevereiro de 2016.

BANCA EXAMINADORA

---

Professor Dr. Carlos Renato Pagotto  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Professor Dr. Luiz Henrique Dias Alves  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Professor MSc. Vitor Mainenti Leal Lopes  
Universidade Federal de Juiz de Fora

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiro a Deus, pela minha vida, me tornando hábil a lutar e superar todas as dificuldades.

À Universidade Federal de Juiz de Fora, pela oportunidade oferecida em cursar Engenharia Mecânica, curso que sempre sonhei em me formar para atingir meus objetivos.

Ao professor Dr. Carlos Renato Pagotto, pela boa vontade e disposição em me orientar neste trabalho.

À empresa U&M Mineração e Construção S/A, pela oportunidade de estágio e conhecimento oferecidos, indispensáveis na minha formação profissional e realização deste trabalho.

Gostaria de agradecer também ao pessoal que me ajudou sanando dúvidas, fornecendo material, recursos e dicas importantíssimas para o desenvolvimento do trabalho.

Agradeço aos meus pais, Sonia e Ronaldo, pelo amor, incentivo, paciência e dedicação imensurável em minha saúde, educação e formação como cidadão. Sem vocês, nada teria sido possível.

Obrigado minhas irmãs Priscilla e Simone, por terem cuidado de mim na infância e apoio e carinho incondicional em todos os momentos da minha vida.

Aos meus amigos e parentes, pelos momentos de descontração e agradabilíssimas reuniões, aos quais não poderei esquecer.

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo a respeito da eficácia de um sistema de filtragem auxiliar de óleo hidráulico, chamado diálise *online*, instalado em uma máquina escavadeira hidráulica que opera em mineração de minério de ferro. O local de operação da escavadeira expõe-na à contaminação por partículas sólidas do meio ambiente, como terra e poeira. O sistema hidráulico possui peças móveis com folgas muito pequenas, sensíveis a partículas contaminantes, que são prejudiciais. O objetivo da diálise *online* é diminuir o nível de contaminação do óleo hidráulico da escavadeira e aumentar a vida útil dos componentes quanto a danos causados por contaminação. A verificação do estado do óleo para avaliação da eficácia da diálise foi feita por meio de análise laboratorial em uma empresa especializada. Esta fez a contagem de partículas, pela contagem automática de partículas (APC) e detecção de elementos químicos, pela espectrometria por plasma indutivamente acoplado (ICP), de amostras coletadas na operação. Os resultados dos testes laboratoriais são disponibilizados em uma tabela em forma de histórico que permite monitorar os níveis de contaminação do fluido periodicamente. Os resultados obtidos mostraram que os níveis de contaminação do fluido praticamente não sofreram alterações positivas durante a utilização da diálise. As contagens de partículas maiores, de 14 a 50  $\mu\text{m}$ , mais nocivas, apresentaram tendência em aumentar durante o período de utilização da filtragem auxiliar, assim como os teores de ferro, que subiram. Estes resultados motivaram a empresa proprietária da escavadeira a desinstalar o sistema de diálise *online*, pois os resultados obtidos ficaram aquém do esperado. Após a desmontagem, foi retirado o filtro para verificação do material filtrante quanto a danos durante a operação. Não foram encontrados danos no filtro, que se manteve em bom estado por 4000 horas de utilização. A conclusão do estudo é que o sistema de filtragem escolhido não apresenta benefícios para o óleo hidráulico da escavadeira em relação ao nível de contaminação que apresentava anteriormente.

Palavras-chave: diálise, sistema hidráulico, filtragem, contaminação.

## ABSTRACT

This work presents a study about the effectiveness of a hydraulic oil auxiliary filtration system, called online dialysis, installed in a hydraulic excavator machine that operates in a iron ore mining site. The operating site of the excavator exposes it to solid particle contamination from the environment, like dirt and dust. The hydraulic system has internal moving parts with very small clearances sensitive to contaminant particles, which are harmful. The purpose of online dialysis is to decrease the hydraulic oil contamination level of the excavator and extend the life of the components from damage caused by contamination. The verification of the oil condition to evaluate the efficacy of the dialysis was performed by laboratory analysis in a specialized company. It performed the particles counting by automatic particles counting (APC) and the detection of chemical elements by inductively coupled plasma spectrometry (ICP) of samples collected in the operating site. The results of laboratory tests are available in a history table so that you can monitor the fluid contamination levels periodically. The results showed that the fluid contamination levels did not suffer significant positive changes during the use of the dialysis. The counting of higher particles, from 14 to 50  $\mu\text{m}$ , more harmful, tended to increase during the use of the auxiliary filtering, as well as the iron content, which also increased. These results motivated the company, which owns the excavator, to uninstall the online dialysis system because the results were below expectations. The filter was removed for verification of the filtering material for damage during operation. No damages were found in the filter, which remained in good condition for 4000 hours of use. The conclusion is that the filtration system chosen has no benefits for the excavator hydraulic oil concerning the level of contamination that previously presented.

Keywords: dialysis, hydraulic system, filtration, contamination.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de coleta. (a) Encaixe da mangueira na bomba a vácuo, (b) limpeza do local de coleta, (c) encaixe do frasco na bomba e inserção da mangueira no compartimento para sucção. ....	6
Figura 2 - Plasma indutivamente acoplado.....	7
Figura 3 - Contador automático de partículas. ....	7
Figura 4 - (1) Concha, (2) Semibraço, (3) Braço, (4) Estrutura superior, (5) Carro inferior, (6) Cilindro da concha, (7) Cilindro do braço, (8) Cilindro do semibraço. ....	11
Figura 5 - Remoção de material do solo.....	11
Figura 6 - Levantamento de material.....	11
Figura 7 - Despejo de material em um caminhão.....	11
Figura 8 - Escavadeira girando a estrutura superior. ....	11
Figura 9 - (a) Deslocamento à frente da escavadeira, (b) sentido de giro da roda dentada.....	12
Figura 10 - Relação de componentes do sistema hidráulico de uma escavadeira. ....	13
Figura 11 - Exemplo de sistema em que ocorre multiplicação de força.....	14
Figura 12 - Exemplificação de um sistema hidráulico. ....	16
Figura 13 - Simbologia dos componentes abordados.....	19
Figura 14 - Exemplo de sistema hidráulico de extensão de cilindro, (a) e (b). ....	20
Figura 15 - Exemplo de sistema hidráulico de retorno de cilindro. ....	21
Figura 16 - Movimento de superfícies paralelas, separadas por uma camada de óleo.....	23
Figura 17 - Diagrama do índice de viscosidade. ....	24
Figura 18 - Bomba de pistões axiais de prato inclinado de deslocamento variável. ....	29
Figura 19 - Bomba de engrenagens externas.....	30
Figura 20 - Bomba de palhetas móveis. ....	31
Figura 21 - Motor da FZ-2399 com seu PTO.....	31
Figura 22 - Bombas ligadas ao PTO.....	31
Figura 23 - Tambor e pistões de uma bomba de pistão axial. ....	32
Figura 24 - Cilindro hidráulico.....	33
Figura 25 - Cilindro de duplo efeito. ....	34
Figura 26 - Motor de pistões axiais. ....	35
Figura 27 - Motor de pistões de eixo inclinado. ....	35
Figura 28 - Cilindro da FZ-2399. ....	36
Figura 29 - Pistão de cilindro da FZ-2399.....	36

Figura 30 - Motor de translação e comando final.....	37
Figura 31 - Motores e um comando de giro. ....	37
Figura 32 - Motores dos ventiladores. ....	37
Figura 33 - Carretel deslizante.....	39
Figura 34 - Elemento de assento cônico. ....	39
Figura 35 - Válvula de bypass (indicada). ....	39
Figura 36 - Bloco de válvulas de controle principal, de nove válvulas carretel, ligado às bombas principais 1 e 2. ....	40
Figura 37 - Bloco de válvulas de controle de giro, de quatro válvulas carretel, ligado à bomba principal 3. ....	40
Figura 38 - Carretéis das válvulas. ....	41
Figura 39 - Válvula de alívio principal.....	41
Figura 40 - Irregularidades em uma superfície.....	42
Figura 41 - Superfície de material macio sendo danificada. ....	43
Figura 42 - Soldagem de duas superfícies pressionadas.....	43
Figura 43 - Desgaste a três corpos e dois corpos.....	44
Figura 44 - Desgaste adesivo.....	44
Figura 45 - Esquema do colapso de uma bolha de gás em um líquido.....	45
Figura 46 - Lubrificação hidrodinâmica em um bloco deslizante. ....	47
Figura 47 - Lubrificação limítrofe. ....	47
Figura 48 - Cavitação em placa de válvulas. ....	48
Figura 49 - Partículas em numa válvula carretel. ....	51
Figura 50 - Assentamento de sedimentos de partículas.....	51
Figura 51 - Desgaste abrasivo numa bomba de engrenagens. ....	52
Figura 52 - Exemplo comparativo de tamanho de partículas. ....	52
Figura 53 - Partícula irregular sendo representada por seu diâmetro projetado.....	52
Figura 54 - Diferenças entre níveis de contaminação por inspeção visual.....	54
Figura 55 - Dois tipos de filtros.....	55
Figura 56 - Esquema de seção transversal de uma fibra capturando partículas. ....	57
Figura 57 - Meio fibroso retendo partículas (indicadas). ....	57
Figura 58 - Filtragem por superfície.....	57
Figura 59 - Filtragem por profundidade. ....	58
Figura 60 - Diferença de retenção entre os dois tipos de filtro.....	58
Figura 61 - Desempenho de filtragem de fluxo estável e fluxo interrompido.....	60



Figura 62 - Vazamento em cilindro.....	61
Figura 63 - Filtro do respiro do tanque hidráulico.....	61
Figura 64 - Aparelho de filtragem auxiliar FOL-15-M-24-DM2-PF (a) e o filtro (b). ....	67
Figura 65 - FZ-2399 4020 em operação. Vemos a localização do tanque hidráulico e do aparelho de diálise. ....	68
Figura 66 - Conexão de sucção de óleo (a) na parte inferior do tanque e aparelho de diálise (b) instalado.....	69
Figura 67 - Retorno de óleo ao tanque. ....	69
Figura 68 - Circuito hidráulico do sistema de diálise online. ....	70
Figura 69 - Simulação do sistema de diálise online. As linhas em azul são as alimentadas pelo fluido.....	70
Figura 70 - Gráfico comparativo de código ISO. ....	74
Figura 71 - Comparativo entre contagem de partículas para 4, 6 e 14 $\mu\text{m}$ .....	76
Figura 72 - Teores de cobre e ferro. ....	78
Figura 73 - Estado do filtro. (a) Sem ondulações, (b) sem furos, (c) sem sujeira visível.....	80
Figura 74 - Impureza decantada no compartimento do filtro. ....	81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diagrama de viscosidade ISO 3448:1992. ....	26
Tabela 2 - Dados do óleo hidráulico utilizado na FZ-2399. ....	27
Tabela 3 - Determinação do código ISO. ....	53
Tabela 4 - Código ISO com base em medição de 100 mL. ....	54
Tabela 5 - Eficiência de filtro e classificação beta. ....	59
Tabela 6 - Atividades de manutenção do sistema hidráulico. ....	65
Tabela 7 - Plano de manutenção feito pela U&M. ....	65
Tabela 8 - Especificações do aparelho de diálise. ....	67
Tabela 9 - Comparação de códigos ISO antes e depois da instalação da diálise. ....	73
Tabela 10 - Comparação de contagem de partículas antes e depois da instalação da diálise. ....	75
Tabela 11 - Teores em ppm de elementos químicos relevantes ao estudo. ....	77
Tabela 12 - Resultados de análise por código ISO após a retirada da diálise. ....	78
Tabela 13 - Contagem de partículas durante e após a utilização da diálise. ....	79
Tabela 14 - Teores de elementos químicos após a retirada da diálise. ....	79

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

$p$  – pressão de fluido

$F$  – força

$A$  – área

$v$  – volume

$y$  – distância percorrida pelo êmbolo

$\rho$  – densidade

$m$  – massa

$\mu$  – viscosidade absoluta

$V$  – velocidade

$h$  – espessura da película de óleo ou distância entre placas paralelas

$\nu$  – viscosidade cinemática

$W$  – trabalho

$\alpha$  – inclinação do prato de bomba de pistões ou do eixo inclinado

$c$  – curso do pistão da bomba

$P$  – carga

$S_m$  – tensão de cisalhamento

$\Delta p$  – pressão diferencial

$\beta_x$  – razão beta

$x$  – tamanho de partícula

$N_e$  – número de partículas por unidade de volume que entram

$N_s$  – número de partículas por unidade de volume que saem

$E_x$  – eficiência do filtro

part – partículas

ppm – partes por milhão

APC – *Automatic Particles Counting*

ICP – *Inductively Coupled Plasma*

ISO – *International Organization for Standardization*

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

DIN - *Deutsches Institut für Normung*

IV – Índice de Viscosidade

VG – *Viscosity Group*

PTO – *Power Train Output*

SAE – *Society of Automotive Engineers*

NOR – normal

MON – monitorar

CRI – crítico

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. ESTRUTURA DO TRABALHO .....	2
1.2. JUSTIFICATIVA .....	2
1.3. ESCOPO DO TRABALHO.....	3
1.4. OBJETIVOS .....	4
1.4.1. Objetivos gerais.....	4
1.4.2. Objetivos específicos .....	4
1.5. METODOLOGIA .....	5
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>10</b>
2.1. ESCAVADEIRA .....	10
2.1.1. Relação entre componentes hidráulicos e mecânicos .....	12
2.2. SISTEMAS HIDRÁULICOS .....	13
2.2.1. Princípio de funcionamento .....	14
2.2.2. Componentes constituintes.....	16
2.2.2.1. Meio motor .....	16
2.2.2.2. Bomba .....	16
2.2.2.3. Válvulas.....	17
2.2.2.4. Atuadores.....	17
2.2.2.5. Tanque .....	17
2.2.2.6. Tubulações.....	17
2.2.2.7. Filtro .....	18
2.2.3. Simbologia .....	18
2.2.4. Aplicação na FZ-2399 .....	19
2.3. FLUIDOS HIDRÁULICOS .....	21
2.3.1. Propriedades dos fluidos hidráulicos .....	22
2.3.2. Classificação segundo a viscosidade.....	26
2.3.3. Manutenção .....	27
2.3.4. Fluido empregado na FZ-2399 pela U&M.....	27
2.4. BOMBAS HIDRÁULICAS .....	27
2.4.1. Princípio de funcionamento .....	28
2.4.2. Tipos de bombas .....	29
2.4.2.1. Bombas de pistões axiais.....	29
2.4.2.2. Bomba de engrenagens externas .....	30

2.4.2.3. Bomba de palhetas móveis .....	30
2.4.3. Aplicação na FZ-2399 .....	31
2.5. ATUADORES HIDRÁULICOS .....	32
2.5.1. Método de operação .....	33
2.5.2. Tipos de atuadores.....	33
2.5.2.1. Cilindros .....	33
2.5.2.2. Motores rotativos.....	34
2.5.3. Aplicação na FZ-2399.....	35
2.6. VÁLVULAS .....	37
2.6.1. Descrição do componente .....	38
2.6.2. Tipos de elementos de válvulas.....	38
2.6.2.1. Válvulas com elementos deslizantes .....	38
2.6.2.2. Válvulas com elementos de assento .....	39
2.6.3. Aplicação na FZ-2399 .....	40
2.7. ATRITO, DANOS EM SUPERFÍCIES E LUBRIFICAÇÃO .....	41
2.7.1. Causas do atrito.....	42
2.7.1.1. Cisalhamento .....	42
2.7.1.2. Adesão .....	43
2.7.2. Tipos de danos em superfícies .....	43
2.7.2.1. Desgaste abrasivo .....	43
2.7.2.2. Desgaste adesivo .....	44
2.7.2.3. Cavitação .....	44
2.7.3. Lubrificação .....	45
2.7.3.1. Lubrificação hidrodinâmica .....	45
2.7.3.2. Lubrificação hidrostática .....	46
2.7.3.3. Lubrificação limítrofe.....	46
2.7.4. Potenciais danos no sistema hidráulico da FZ-2399 .....	47
2.8. CONTAMINAÇÃO E FILTRAGEM .....	48
2.8.1. Partículas contaminantes.....	49
2.8.1.1. Origem da contaminação.....	49
2.8.1.2. Efeitos da contaminação.....	50
2.8.1.3. Formato e tamanho de partículas.....	52
2.8.1.4. Nível de contaminação .....	53
2.8.3. Filtragem .....	55
2.8.3.1. Mecanismos de filtragem .....	56
2.8.3.2. Classificação dos filtros.....	58

2.8.3.3. Filtragem pulsada .....	60
2.8.3.4. Modos de falha de filtro .....	60
2.8.4. Contaminação e filtragem na FZ-2399 .....	61
<b>2.9. MANUTENÇÃO .....</b>	<b>62</b>
2.9.1. Tipos de manutenção.....	62
2.9.1.1. Manutenção corretiva .....	62
2.9.1.2. Manutenção Preditiva.....	63
2.9.1.3. Manutenção preventiva .....	64
2.9.2. Manutenção na FZ-2399 .....	64
<b>3. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO DE DIÁLISE <i>ONLINE</i> .....</b>	<b>66</b>
3.1. ESPECIFICAÇÕES E ESCOLHA DO APARELHO.....	66
3.2. MONTAGEM NA FZ-2399 4020 .....	68
3.3. CIRCUITO HIDRÁULICO.....	69
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>72</b>
4.1. RESULTADOS DA ANÁLISE DE ÓLEO.....	72
4.3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	81
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>83</b>
5.1. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	83
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>84</b>
<b>ANEXO 1 – TERMO DE AUTENTICIDADE .....</b>	<b>88</b>
<b>ANEXO 2 – DECLARAÇÃO DA EMPRESA.....</b>	<b>89</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho trata do monitoramento de nível de contaminação de fluido hidráulico, que é objeto de interesse dos segmentos do mercado que empregam máquinas de grande porte que fazem utilização de sistemas hidráulicos. Estes equipamentos, muitos operando na área da construção ou da mineração, estão sempre envoltos por partículas sólidas em suspensão no ar que podem penetrar em sistemas críticos responsáveis por sua operação, como motor, sistemas de transmissão e sistemas hidráulicos. Além disto, desgastes mecânicos em decorrência de contaminação externa e utilização severa devem ser tratados com assiduidade. As empresas precisam sempre buscar meios de impedir ou amenizar a influência negativa do meio ambiente na integridade de seus ativos, através de ferramentas como inspeções, planejamento de manutenção e monitoramentos.

As atividades econômicas com respeito à construção e mineração, que empregam milhões de pessoas ao redor do mundo e que contribuem para a economia global, estão sempre ligadas às companhias preocupadas com a disponibilidade e produtividade de seus equipamentos. Como estes frequentemente têm um alto custo de aquisição, é esperado que as empresas proprietárias tenham intenção em mantê-los operando o maior tempo possível com o menor custo de manutenção. Para este objetivo ser alcançado de maneira satisfatória, componentes responsáveis pelo desempenho na operação precisam ser preservados para que sejam um aliado a uma vida útil sempre longa.

No trabalho fez-se o monitoramento de nível de contaminação de óleo hidráulico de uma escavadeira que atua em extração de minério de ferro. Com intuito de diminuir a contaminação do fluido por partículas provenientes do ambiente e de desgaste interno de componentes do referido sistema, uma empresa de mineração, a U&M, efetuou um experimento em uma de suas escavadeiras, a FZ-2399 do fabricante A e número de frota 4020. O experimento consiste na instalação de um aparelho de filtragem auxiliar de óleo hidráulico, chamado de **diálise online**, com objetivo de diminuir os níveis de contaminação e consequentemente a incidência de falhas decorrentes.

A contaminação de óleo hidráulico tem como consequências perda de desempenho da máquina e falhas em componentes. O monitoramento das condições de limpeza do fluido, um instrumento de manutenção preditiva, é de relevante importância na avaliação de tendência de desgaste do sistema e na identificação de anormalidades. O monitoramento do óleo da escavadeira é feito por meio de coleta de amostras em intervalos regulares de operação da mesma. As amostras são enviadas para o laboratório de análise, que faz a



contagem e medição das partículas presentes, bem como a identificação dos elementos químicos no fluido. Esta análise auxilia a manutenção a monitorar o equipamento e providenciar medidas corretivas quando necessário. Agindo assim, em conjunto com manutenção preventiva, espera-se um desempenho satisfatório e maior vida útil da máquina, com o mínimo de paradas durante a operação e menor índice de manutenção corretiva.

## 1.1. ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho é iniciado no capítulo 1, introdutório, que contém a introdução que discorre sobre o contexto que motivou a pesquisa sobre o tema abordado e o projeto realizado pela empresa U&M. Após a introdução, são apresentados o escopo do trabalho, os objetivos pretendidos, a metodologia utilizada para a verificação dos resultados e este texto explicativo sobre o conteúdo desenvolvido.

O capítulo 2 é o referencial teórico, com a apresentação da escavadeira hidráulica e uma breve explicação sobre sua operação. São abordados os sistemas hidráulicos e seus componentes, de forma aplicada na escavadeira em estudo, conceitos de desgaste, danos em superfícies e lubrificação, fundamentos de contaminação e de filtragem e tipos de manutenção e análise de óleo. Estes assuntos foram pesquisados em diversas referências bibliográficas e em literaturas técnicas de empresas especializadas, que permitiram a criação de um referencial teórico sequenciado e voltado para o tema do trabalho.

O desenvolvimento do projeto de diálise *online* é apresentado no capítulo 3, com ilustrações para melhor compreensão, esquema hidráulico e características técnicas.

Os resultados referentes à eficácia do sistema de diálise nos níveis de contaminação tendo como base os resultados de análise de óleo e análises visuais são mostrados no capítulo 4. A discussão dos resultados é apresentada no mesmo capítulo, na seção 4.1, na qual são interpretados os dados obtidos.

A conclusão do trabalho é feita no capítulo 5. Nele a decisão sobre a utilização do sistema de diálise *online* é feita de forma crítica do ponto de vista dos resultados obtidos. Após a conclusão, uma breve recomendação para trabalhos futuros é discutida na seção 5.1.

## 1.2. JUSTIFICATIVA

A importância deste trabalho está embasada na relação existente entre sistemas hidráulicos e contaminação. É categoricamente afirmada no trabalho a periculosidade que partículas contaminantes sólidas oferecem à integridade e funcionamento adequado dos

sistemas hidráulicos. Com finalidade de disseminar o conhecimento com respeito ao controle de contaminação destes sistemas e propor soluções práticas, o trabalho fornece informações relevantes a respeito do tema e desenvolve uma proposta de projeto de um sistema de filtragem complementar de fluido hidráulico. Este sistema tem como função diminuir níveis de contaminação do fluido de uma máquina ou sistema que é aplicado.

O referencial teórico é pouco publicado em literatura disponível comercialmente e este trabalho pretende acercar a teoria envolvida e aplicá-la a uma situação real.

O desenvolvimento do projeto e os resultados alcançados são relevantes para empresas ou demais áreas que se preocupam com a confiabilidade e disponibilidade de seus ativos. Quanto mais os equipamentos operarem sem falhas ou complicações, maior a produtividade e resultado financeiro de uma companhia, podendo esta investir mais em equipamentos e efetuar mais contratações.

### 1.3. ESCOPO DO TRABALHO

Como foi dito na introdução, a atividade mineradora expõe a escavadeira hidráulica aos agentes contaminantes do meio ambiente. Partículas sólidas contaminantes que circulam no fluido afetam muito os sistemas hidráulicos, pois elas provocam desgaste e travamento em peças em movimento relativo. O desgaste causa perda de rendimento e pode provocar falhas catastróficas em componentes. Isto implicaria em máquina parada à espera de componente para reposição, gerando prejuízos à companhia.

O que pode ser feito para evitar perdas de ativos e garantir vida útil longa? Manutenção e monitoramento de níveis de contaminação de óleo são tarefas extremamente importantes para alcançar este objetivo, pois podemos diminuir muito a presença de partículas nocivas que provocam desgaste.

A manutenção deve começar na prevenção da entrada de contaminação no sistema hidráulico. O próximo passo é remover contaminantes que estiverem presentes e por fim monitorar o nível de contaminação. O monitoramento nos permite saber a real condição em que um fluido está e a tendência que ele mantém ao longo de seu processo de utilização.

Para conseguir-se um baixo nível de contaminação, deve-se diminuir a entrada de contaminantes e melhorar a captura de partículas que circulam no fluido. Como é possível fazer isto? Inspeção de vedações e detecção de vazamentos é uma tarefa para controle de entrada de contaminação externa. Utilização de filtros de alta eficiência melhoraria a retenção de partículas. Pode-se inclusive melhorar a filtragem por meio da utilização de um sistema

auxiliar, ou de diálise, que opera separado do circuito hidráulico principal da máquina utilizando um filtro com maior capacidade de retenção de partículas. Este trabalho faz a avaliação de um sistema instalado na escavadeira FZ-2399 4020 da U&M.

A verificação de eficácia da diálise pode ser verificada por meio do monitoramento do nível de contaminação, estando atento aos resultados de análise de óleo feitos em laboratório, que contêm a contagem de partículas suspensas no fluido e o tamanho e natureza química das mesmas. Inspeção visual do filtro utilizado nos permite verificar se há sujidade visível e se o filtro resiste às condições de operação impostas. O monitoramento do nível de contaminação de fluido hidráulico da escavadeira e inspeção visual do filtro da filtragem auxiliar são os métodos de averiguação de resultados deste trabalho.

#### 1.4. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é verificar a eficácia do sistema de filtragem auxiliar fabricado pela Empresa H, a diálise *online*, instalado na escavadeira hidráulica FZ-2399 através de monitoramento de tendência de níveis de contaminação de fluido hidráulico.

##### 1.4.1. Objetivos gerais

De maneira abrangente, o trabalho objetiva verificar se a diálise utilizada pela U&M traz algum benefício apreciável em escavadeiras com volume de óleo hidráulico na faixa de 1000 L, operando em mineração.

##### 1.4.2. Objetivos específicos

Partindo para objetivos mais específicos, além de verificar os resultados com respeito da eficácia da filtragem auxiliar, o trabalho pretende mostrar se a diálise *online* é vantajosa do ponto de vista do monitoramento de nível de contaminação por meio de análise de contagem, medição e natureza química de partículas no fluido. Esta prática é realizada pela U&M e recentemente muito disseminada na indústria que emprega equipamentos providos de força fluida. Além do monitoramento, pretende-se verificar a adequação do aparelho de diálise escolhido ao trabalho na máquina de escavação.

## 1.5. METODOLOGIA

O trabalho explica com detalhes as características técnicas do aparelho de filtragem adquirido e comenta sobre os critérios levados em consideração para a escolha do modelo. O aparelho é um conjunto de motor, bomba e filtro fabricados pela Empresa H. A instalação na escavadeira é ilustrada por meio de fotografias da própria FZ-2399 4020 no local de operação. Um circuito hidráulico representativo do sistema de diálise *online* desenhado com o *software* Automation Studio 5.0 proporciona um entendimento mais técnico e universal a respeito do projeto.

A ferramenta utilizada para a investigação do estado do óleo hidráulico e do nível de desgaste do sistema hidráulico da escavadeira em estudo é a análise de fluido em laboratório. A U&M contrata o serviço de análise de óleo da empresa especializada chamada neste trabalho de **Empresa S**, por questão de sigilo. Os testes realizados pelo laboratório em óleo hidráulico incluem contagem e medição de partículas, verificação de elementos químicos das partículas, nível de água presente e níveis de oxidação e nitratação. Neste trabalho apenas são utilizados os resultados dos testes relacionados a partículas e elementos químicos.

A U&M faz utilização da análise de óleo como um instrumento de manutenção preditiva, que está incluída no processo de manutenção proativa aplicada aos equipamentos. A análise permite o monitoramento de tendência de desgaste dos componentes do equipamento, diagnóstico de problemas ocultos e auxílio em encontrar a causa raiz de problemas. O monitoramento de tendência tem como objetivo acompanhar o estado de determinado componente, impedindo o progresso de problemas, evitando intervenções corretivas custosas.

O início do processo de análise de óleo é a coleta de amostra no equipamento na própria operação durante a realização da manutenção preventiva. A amostra de óleo coletada é devidamente identificada, embalada e enviada à Empresa S para a análise. A empresa fornece um *kit* para a coleta do óleo para compartimentos não pressurizados, composto por uma bomba a vácuo, mangueira e frasco. A figura 1 mostra a utilização e coleta da amostra.

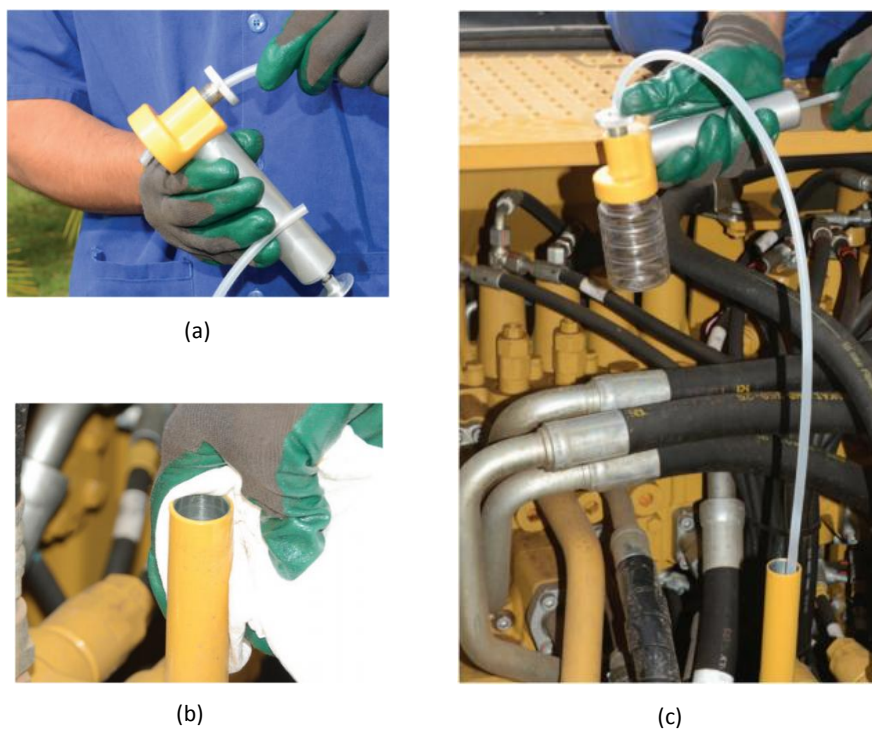


Figura 1 - Processo de coleta. (a) Encaixe da mangueira na bomba a vácuo, (b) limpeza do local de coleta, (c) encaixe do frasco na bomba e inserção da mangueira no compartimento para sucção.

Fonte: Sotreq (2011).

Os métodos do laboratório para os testes de partículas das amostras são a espectrometria por **plasma indutivamente acoplado (ICP)** e a **contagem automática de partículas (APC)**.

O ICP, ilustrado na figura 2, funciona por meio da geração de um plasma de gás argônio através de indução eletromagnética. Amostra é injetada no plasma. O aparelho possui um detector espectrômetro que capta os diferentes comprimentos de onda emitidos pelos diferentes elementos químicos presentes na amostra, sendo capaz de medir os teores de cada elemento detectado.

O APC, como mostra a figura 3, funciona através de espelhamento da partícula de um fluxo de amostra por meio de raio laser em uma célula fotoelétrica. A contagem das partículas é feita por meio da interferência da passagem da luz pelas partículas para a célula fotoelétrica.

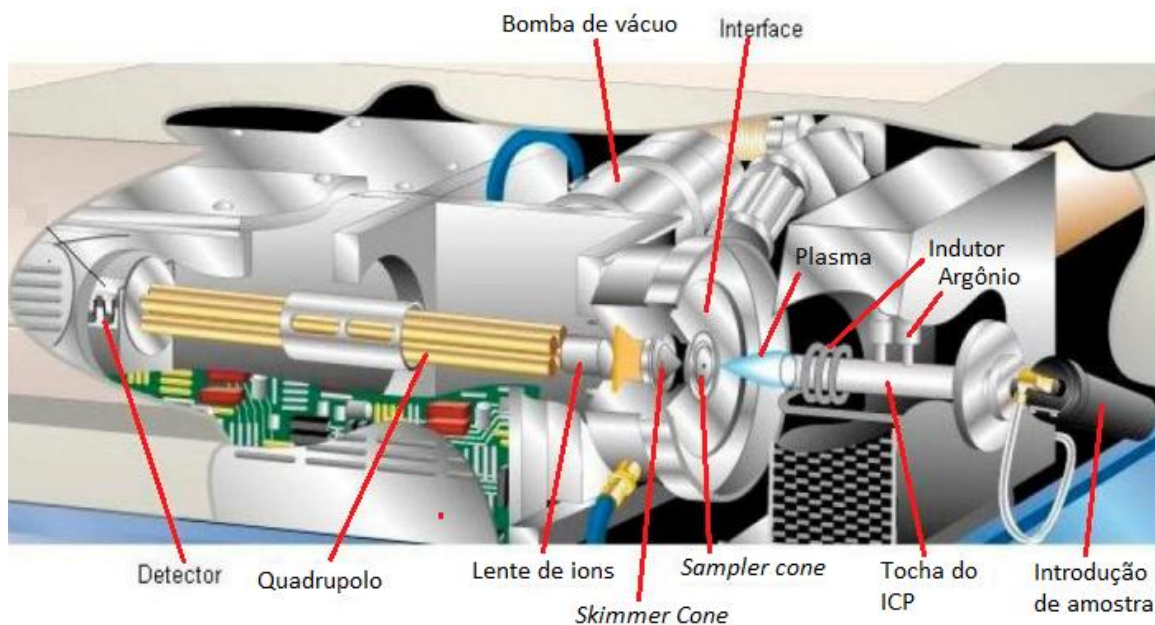


Figura 2 - Plasma indutivamente acoplado.

Fonte: Silva (2009).

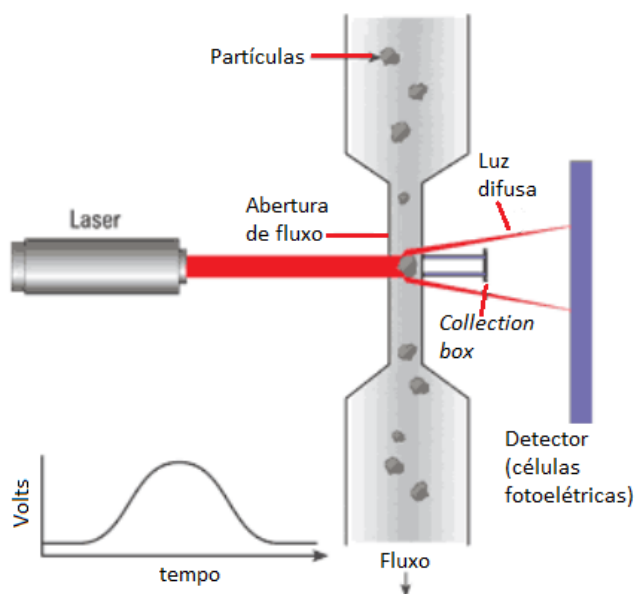


Figura 3 - Contador automático de partículas.

Fonte: Noria Corporation (2002).

Os resultados dos testes incluem o teor em ppm (partes por milhão) dos elementos químicos alumínio (Al), boro (B), cálcio (Ca), cromo (Cr), cobre (Cu), ferro (Fe), chumbo (Pb), magnésio (Mg), molibdênio (Mo), níquel (Ni), fósforo (P), potássio (K), silício (Si), prata (Ag), sódio (Na), estanho (Sn) e zinco (Zn), presentes na amostra detectados pelo ICP; a contagem de partículas por 1 mL de amostra de 4, 6, 10, 14, 18, 21, 38 e 50  $\mu\text{m}$ , realizada

pelo APC e o código ISO da amostra, determinado pela norma ISO 4406:1999 para quantificar as partículas no fluido quanto ao tamanho e quantidade.

A verificação de elementos químicos é uma análise qualitativa que nos dá um indicativo da origem de desgaste e origem de contaminação. Os teores dos elementos nos permitem fazer um monitoramento de tendência do desgaste das peças e de entrada de contaminantes externos. A contagem é uma análise quantitativa que nos possibilita observar o nível de contaminação do óleo pelo número e tamanho das partículas.

A Empresa S disponibiliza os resultados em seu site na Internet e organiza-os em forma de histórico numa tabela. Além dos resultados citados no parágrafo anterior, a tabela contém as datas das coletas, horas de operação do óleo e do equipamento e um código de avaliação da amostra, que classifica o *status* da mesma quanto aos teores dos elementos químicos encontrados que indicam desgaste interno. Os códigos são: **normal**, em que há situação de desgaste normal; **monitorar**, que é um sinal de alerta para haver um monitoramento das condições do óleo e equipamento; e **crítico**, no qual representa um nível de desgaste acima do normal que exige parada e intervenção no equipamento.

Este trabalho utiliza os dados disponibilizados pela Empresa S para verificação do estado do óleo hidráulico da FZ-2399. É feita comparação entre o óleo utilizado antes da diálise e após o início da operação do sistema, na unidade 4020. Mais adiante, compara-se o estado do óleo durante a utilização da diálise e após sua remoção da máquina.

Os dados disponibilizados pela Empresa S relevantes ao trabalho são organizados em três tabelas. A primeira tabela mostra os códigos ISO de cada amostra, a segunda inclui a contagem de partículas e a terceira contém os elementos químicos encontrados considerados para análise de desgaste e contaminação. Gráficos também estão disponíveis para visualização destas informações.

Por último, é feita uma análise visual do filtro da diálise, em que são avaliadas as condições do mesmo após 4062 horas de utilização. Inspecciona-se a integridade do meio filtrante e se há sujidade visível. Com o filtro removido, é feita uma inspeção interna do aparelho de diálise e do compartimento do filtro em busca de acúmulo de contaminação. A avaliação visual tem como principal objetivo conferir a adequação do meio filtrante à aplicação na escavadeira hidráulica.

Em decorrência do trabalho contínuo na mina e normas internas da mesma, não foi possível fazer análise criteriosa do estado da escavadeira, procurar entradas de contaminação e inspecionar hastes de cilindros hidráulicos. A pouca disponibilidade de transporte pela mina

foi outro fator que dificultou o acesso à máquina. Entretanto, foram tiradas fotografias do sistema de diálise *online*.

É importante ressaltar que não foram feitos ensaios para se averiguar a qualidade do filtro da diálise. A universidade não dispõe de recursos para o teste de filtro e não foram encontrados serviços externos que fizessem o teste de maneira acessível.

A conclusão do trabalho é baseada nos dados e tendências estabelecidas pelas tabelas e gráficos e na relação com recomendações da Empresa S para nível de contaminação em sistema hidráulicos. A determinação entre a utilização ou não da diálise será levada em consideração com respeito ao nível de contaminação, se este atingiu ou pelo menos se aproximou das expectativas.



## 2. REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo disponibiliza a base teórica necessária para a compreensão do objeto de estudo do trabalho e para a interpretação dos resultados. A operação da escavadeira, sistemas hidráulicos, fluidos hidráulicos, conceitos de atrito, desgaste, lubrificação, contaminação, filtragem e manutenção são dissertados com base em bibliografias, materiais técnicos de empresas especializadas e conhecimento de pessoal que atua na área.

### 2.1. ESCAVADEIRA

A extração de minério de ferro do solo pela empresa U&M é feita com escavadeiras hidráulicas, que conseguem alta produtividade e longos ciclos de operação contínuos. Estes equipamentos são bastante complexos e permitem diversos tipos de movimentos em seus conjuntos móveis, de maneira a realizar o trabalho com rapidez e grande eficiência.

As escavadeiras hidráulicas são equipamentos móveis concebidos para escavar e retirar uma porção de material granulado do solo, tais como terra, areia, pedras, etc. e despejar em um local desejado. As figuras 5, 6 e 7 mostram os principais movimentos na operação desempenhados pela escavadeira A FZ-2399 da U&M. Para isto, utiliza-se um recipiente que penetre o solo e retire um volume de material, chamado concha. A concha é ligada ao semibraço e este é ligado ao braço. Estas peças são conectadas por articulações com pinos e o conjunto formado por elas é ligado à estrutura superior do equipamento na parte dianteira, como pode ser observado na figura 4.

O movimento do conjunto formado por concha, semibraço e braço é feito por meio de cilindros hidráulicos alimentados por fluido em alta pressão provido por bombas.

Para garantir uma rápida e versátil operação à escavadeira, é necessária a remoção de material do solo e sua rápida deposição no lugar desejado. Para cumprir esta tarefa, o equipamento é capaz de girar a estrutura superior em relação ao carro inferior, como mostrado na figura 8. Este movimento rotacional é proporcionado por dois motores hidráulicos, os motores de giro, que recebem energia por meio de fluido em alta pressão e transmitem movimento para caixas de redução chamadas de comando de giro.

O conjunto de braços, concha e carro superior são chamados de **implementos**.

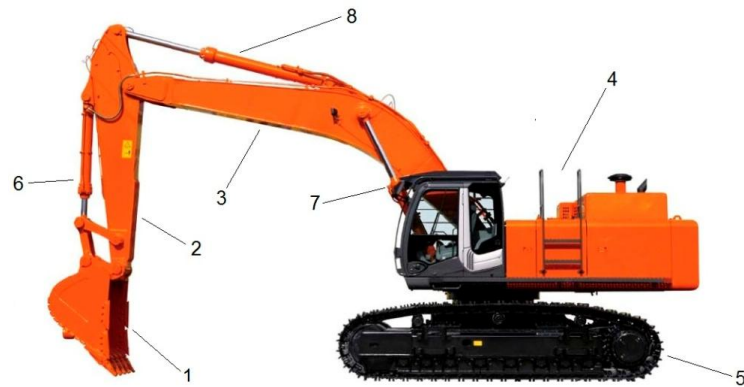


Figura 4 - (1) Concha, (2) Semibraço, (3) Braço, (4) Estrutura superior, (5) Carro inferior, (6) Cilindro da concha, (7) Cilindro do braço, (8) Cilindro do semibraço.

Fonte: Site da Internet<sup>1</sup>.



Figura 5 - Remoção de material do solo.

Fonte: U&M (2015).



Figura 6 - Levantamento de material.

Fonte: U&M (2015).



Figura 7 - Despejo de material em um caminhão.

Fonte: U&M (2015).



Figura 8 - Escavadeira girando a estrutura superior.

Fonte: Site da Internet<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Disponível em: <<http://www.scaravillisalvatore.it/immagini/gallery/nuovo01.jpg>>. Acesso em: 17 mai. 2015.

<sup>2</sup> Disponível em: <[https://www.hitachi-cm.com/asia/images/products/excavator/large/ex1200-6/KS\\_EN112\\_04.jpg](https://www.hitachi-cm.com/asia/images/products/excavator/large/ex1200-6/KS_EN112_04.jpg)>. Acesso: em 17 mai. 2015.

Durante a operação, a escavadeira precisa se locomover até um ponto estratégico para executar a tarefa de remoção e despejo de material. Por se tratar de um equipamento grande e pesado, seu deslocamento se dá em baixa velocidade. Para vencer a inércia e forças de atrito, dois motores hidráulicos, os motores de translação, são responsáveis por transmitir movimento, cada um, a uma caixa de redução de velocidade, chamada de comando final, instalada internamente em uma roda dentada responsável por mover a esteira do carro inferior, como esquematizado na figura 9. As esteiras são constituídas por placas metálicas ligadas em série por juntas articuladas, que permitem uma grande área de contato com o solo, facilitando deslocamento do veículo em terrenos difíceis como lama, areia, pedras, etc.

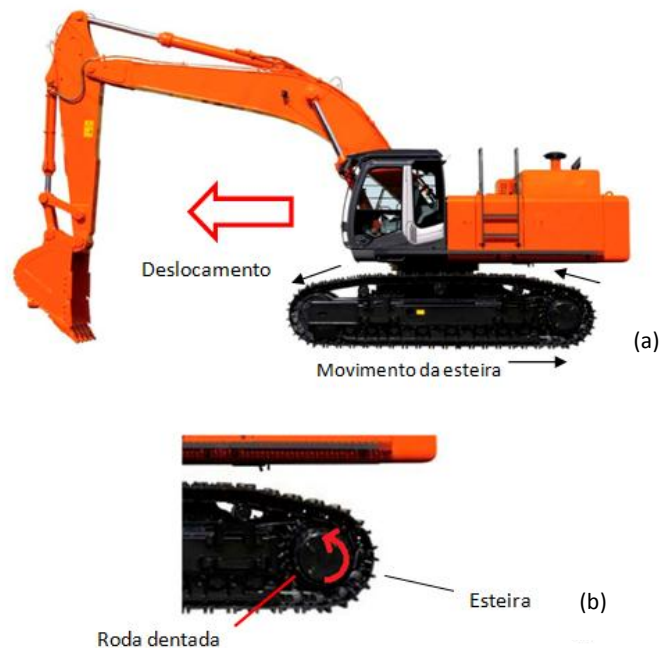


Figura 9 - (a) Deslocamento à frente da escavadeira, (b) sentido de giro da roda dentada.

Fonte: Site da Internet<sup>3</sup>.

### 2.1.1. Relação entre componentes hidráulicos e mecânicos

A figura 10 mostra os componentes do sistema hidráulico da escavadeira responsáveis pela operação da máquina. O motor *Diesel* fornece trabalho para um grupo de bombas hidráulicas que impulsionam o fluido para as válvulas de controle, às quais controlam a passagem do fluido para os motores de translação, rotação e cilindros hidráulicos.

<sup>3</sup> Disponível em: <<http://www.scaravillisalvatore.it/immagini/gallery/nuovo01.jpg>>. Acesso em: 17 mai. 2015.

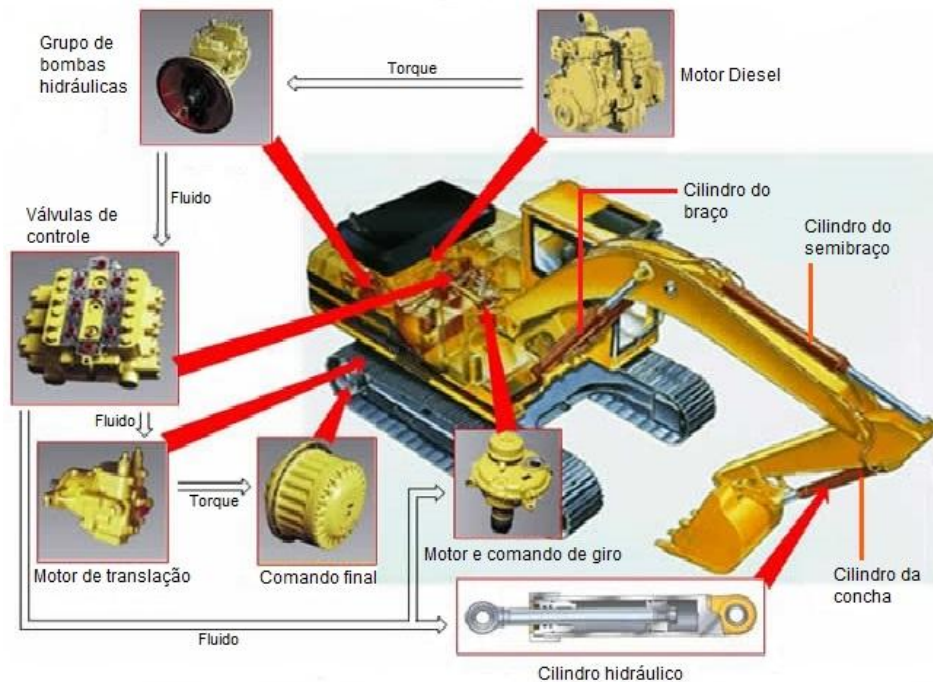


Figura 10 - Relação de componentes do sistema hidráulico de uma escavadeira.

Fonte: Site da Internet<sup>4</sup>.

## 2.2. SISTEMAS HIDRÁULICOS

Os sistemas hidráulicos são amplamente aplicados ao redor do mundo, utilizados largamente em equipamentos que necessitam de força, precisão de movimentos para executar suas tarefas. Eles trabalham por meio de transferência de energia através de fluidos líquidos confinados, que são o veículo de transferência de energia entre uma fonte motora e um dispositivo movido.

Estes sistemas são um dos principais meios de transferência de energia e um dos mais adequados para aplicações terrestres, marítimas e em aviação, pelo fato de conferirem alta confiabilidade, precisão e flexibilidade com grande transferência de força e pequenas dimensões e peso (DANFFOS HYDRAULICS, 1998).

A escavadeira FZ-2399 utiliza sistemas hidráulicos para desenvolver seu trabalho, que exige força, precisão e controle, requerendo a utilização de sistemas mecânicos capazes de atuarem na movimentação de materiais em operação constante movimentando carregamentos com massa na ordem de toneladas.

<sup>4</sup> Disponível em: < <http://www.industriahoje.com.br/wp-content/uploads/2013/06/sistema-hidraulico-escavadeira.jpg>>. Acesso em: 5 jun. 2015.

### 2.2.1. Princípio de funcionamento

O princípio básico de funcionamento de um sistema hidráulico está na aplicação de energia mecânica na entrada de um sistema, promover uma variação de velocidade ou de pressão em um fluido e converter esta energia do fluido em energia mecânica útil de saída (LINSINGEN, 2013).

Segundo Linsingen (2013), **unidade de conversão primária** é onde a energia mecânica é convertida em energia hidráulica, e de **unidade de conversão secundária** o dispositivo que converte a energia hidráulica em trabalho útil. A transferência de energia mecânica ao fluido pode ser por meio de energia de pressão e cinética.

Brain (2000) ensina que o sistema hidráulico tem capacidade de multiplicação de força, na qual uma força aplicada na entrada  $F_1$  é convertida em uma força maior na saída  $F_2$ . A força aplicada no êmbolo menor, da esquerda, gera uma força maior no êmbolo de maior área, à direita, como ilustrado na figura 11. Demonstra-se o princípio da multiplicação de força pelo princípio de Pascal em um sistema estático, que diz “se uma força externa for aplicada a uma parcela de área de um fluido confinado, a pressão decorrente será transmitida integralmente a todo o fluido e à área do recipiente que o contém.” (LINSINGEN, 2013).

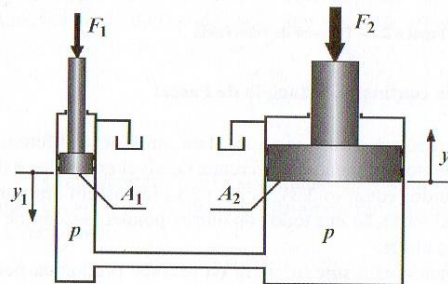


Figura 11 - Exemplo de sistema em que ocorre multiplicação de força.

Fonte: Linsingen (2013).

Na situação de equilíbrio entre  $F_1$  e  $F_2$ , mostrada na figura 11, se estabelecerá uma pressão  $p$  igualmente distribuída por todo o fluido. A área do êmbolo de entrada é  $A_1$  e a área do êmbolo de saída é  $A_2$ . Como pressão pode ser definida como a razão entre uma força e sua área de aplicação, a pressão do fluido será igual à razão da força perpendicular ao êmbolo pelo fluido pela área do êmbolo. Segundo Linsingen (2013) tem-se as relações (1) e (2).

$$p = \frac{F_2}{A_2} = \frac{F_1}{A_1} = \text{constante} \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right] \quad (1)$$

A relação das forças é determinada através da razão das áreas dos pistões:

$$\frac{F_2}{A_2} = \frac{F_1}{A_1} \quad \text{ou} \quad F_2 = \frac{A_2}{A_1} \cdot F_1 \quad (2)$$

Linsingen (2013) escreve que para a razão de áreas dos êmbolos  $A_2 / A_1 \gg 1$ , uma força pequena  $F_1$  é capaz de vencer grandes cargas como  $F_2$ . Essa multiplicação de força é na maioria dos casos o objetivo dos sistemas hidráulicos. Considerando o fluido incompressível, o movimento dos êmbolos nos dois cilindros deslocará o mesmo volume  $v$ , porém a distância  $y$  percorrida pelos êmbolos será diferente. A razão entre as distâncias é inversamente proporcional à razão entre as áreas dos êmbolos. Isto é demonstrado de (3) a (6).

$$v_1 = v_2 \quad (3)$$

$$v = y \cdot A \quad (4)$$

$$y_1 \cdot A_1 = y_2 \cdot A_2 \quad (5)$$

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{A_2}{A_1} \quad (6)$$

Linsingen (2013) cita que o trabalho  $W$  realizado nos dois cilindros será igual. O trabalho é dado como a multiplicação da força pela distância percorrida. Assim, tem-se as relações (7) e (8).

$$W = F_1 \cdot y_1 = F_2 \cdot y_2 \quad (7)$$

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{F_2}{F_1} \quad (8)$$

Pela equação (7), observa-se que o trabalho na entrada é igual ao trabalho na saída e por (8) conclui-se que “a relação entre as forças  $F_1$  e  $F_2$  será igualmente dada em função da razão de deslocamentos” (LINSINGEN, 2013).

De acordo com Stewart (1994), em um sistema hidráulico típico mostrado na figura 12, o fluido flui através de uma tubulação para uma bomba, que é acionada por um meio motor. A bomba, unidade de conversão primária, aumenta a pressão do fluido, que flui por uma válvula de controle de pressão, que é usada para proteger o sistema contra danos caso a pressão atinja um valor máximo de segurança. Outra válvula é a de controle direcional, usada para alterar o fluxo do fluido. Após a passagem pelo controle direcional, o fluido entra no cilindro, unidade de conversão secundária, e atua sobre o pistão. Esta ação da pressão sobre a área do pistão pode ser utilizada para mover dispositivos ou carga.



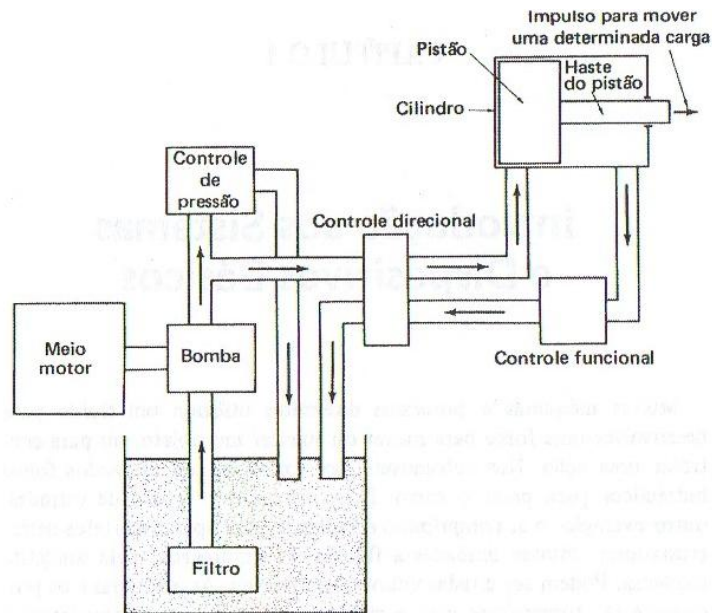


Figura 12 - Exemplificação de um sistema hidráulico.

Fonte: Stewart (1994).

### 2.2.2. Componentes constituintes

Nos componentes principais que constituem o sistema hidráulico tem-se a fonte de energia mecânica, o elemento que fornece energia a um fluido líquido, um caminho por onde o fluido se desloca, um elemento responsável por controlar sua passagem, um elemento de segurança, um dispositivo que converte a energia contida no fluido e um reservatório de armazenamento do líquido.

#### 2.2.2.1. Meio motor

É o acionamento primário, fonte de energia mecânica do sistema e componente que aciona a bomba ou conjunto de bombas. Stewart (1994) afirma que o acionamento pode ser por um motor elétrico, motor a ar, turbina a gás ou por motor de combustão interna. Na escavadeira FZ-2399, é utilizado um motor alternativo de combustão interna movido a óleo *Diesel*.

#### 2.2.2.2. Bomba

Durfee e Sun (2009) escrevem que bombas convertem torque e velocidade de um eixo de entrada em pressão e vazão de um fluido de saída.

As bombas são as unidades de conversão primárias, as principais responsáveis pela atuação dos sistemas hidráulicos, pois transferem energia ao fluido, tendo como produto final energia mecânica útil nos atuadores. A bomba do sistema de diálise *online* em estudo apenas tem função de forçar o óleo a passar por um filtro.

#### 2.2.2.3. Válvulas

Segundo Linsingen (2013), elas podem ser utilizadas como dispositivos de segurança, limitando a pressão do sistema a um determinado valor e podem ser utilizadas como dispositivos de controle direcional, bloqueando, permitindo ou direcionando a passagem do fluido para diferentes pontos do sistema. As válvulas podem ser acionadas por meio mecânico, como as alavancas e *joysticks*; ou por meio da força de pressão de uma linha pressurizada, as chamadas **linhas de pilotagem**.

#### 2.2.2.4. Atuadores

São as unidades de conversão secundária. Stewart (1994) explica que atuadores convertem energia fluida em movimento mecânico. Eles podem produzir movimento linear ou movimento rotativo.

#### 2.2.2.5. Tanque

Tanque, ou reservatório, é onde o fluido hidráulico fica armazenado, mantendo-o disponível para sucção da bomba e recebendo fluido de retorno dos atuadores. De acordo com Danfoss Hydraulics (1998), o tanque tem função de arrefecedor, região de decantação de impurezas e separador de ar e de água do óleo.

#### 2.2.2.6. Tubulações

São os condutores de fluido de um componente a outro do sistema hidráulico, sendo os canos, rígidos e de metal; e as mangueiras, que são flexíveis, utilizadas quando existe movimento relativo entre componentes.

As tubulações devem oferecer resistência a altas pressões e temperaturas de operação, resistência química ao fluido utilizado, à abrasão, forças destrutivas, raios solares,



graxas, substâncias corrosivas e intempéries. Isto é necessário para um seguro e satisfatório funcionamento (STEWART, 1994).

#### 2.2.2.7. Filtro

O filtro tem como função reter partículas estranhas ao sistema hidráulico, que circulam pelo fluido que podem causar danos por abrasão. Estas partículas podem ser provenientes de ingresso de origem externa, desgaste interno do sistema ou estarem presentes em peças devido à fabricação (TESSMANN & HONG, 2000).

### 2.2.3. Simbologia

Segundo Linsingen (2013), os símbolos gráficos são uma forma de identificação de componentes dos sistemas hidráulicos, por meio dos quais podemos construir diagramas de sistemas complexos, de uma forma universal, que possam ser interpretados por qualquer profissional da área.

A simbologia deste trabalho está em concordância com as normas ABNT NBR 8896, ABNT NBR 8897, ABNT NBR 8898, ISO 1219 e DIN 24342/1.

A figura 13 apresenta a simbologia envolvida no exemplo de sistema hidráulico das figuras 14 e 15 e no projeto do sistema de diálise *online*.


















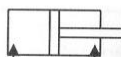


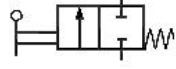
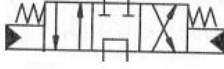

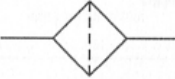
Linhas para equipamento			Setas		
 Linha de trabalho	 Linha de pilotagem	 Linha de dreno	 Movimento de rotação		
 União	 Linha flexível	 Cruzamento	 Movimento retilíneo e direção nas válvulas		
Componentes mecânicos		Bombas		Diversos	
 Haste, movimento linear	 Eixo, movimento rotativo	 Deslocamento fixo	 Deslocamento variável	 Passagem bloqueada	 Mola
Atuadores				Acionamento	
 Motor de desloc. fixo	 Motor de desloc. fixo reversível	 Motor de desloc. var. reversível	 Cilindro de duplo efeito	 Unidade motora	 Motor elétrico
Válvulas				Condicionador	
 Válvula 2 vias 2 posições acionamento por alavanca retorno por mola	 Válv. 4 vias 3 posições acionamento hidráulico centragem por mola	 Válvula de alívio		 Filtro	

Figura 13 - Simbologia dos componentes abordados.

Fonte: Linsingen (2013, adaptado).

#### 2.2.4. Aplicação na FZ-2399

Uma simplificação do sistema hidráulico da escavadeira FZ-2399, o acionamento de cilindro, utilizando componentes representados pela simbologia da figura 13 é mostrada nesta seção.

As linhas em azul representam escoamento de fluido em baixa pressão, que não realiza trabalho em atuadores nem acionando válvulas. As linhas em vermelho representam escoamento de óleo em alta pressão, que aciona atuadores em válvulas. A linha verde representa retorno de fluido para o tanque vindo da válvula 4 vias.

Percebe-se na figura 14 em (a) que as válvulas 2 vias não são acionadas, não havendo pressão piloto na válvula 4 vias, permanecendo centrada. Logo, não há óleo sendo bombeado para o cilindro. Em (b), acionando a válvula 2 vias à esquerda, a válvula 4 vias é acionada por pressão piloto, permitindo a passagem de óleo para estender o cilindro.

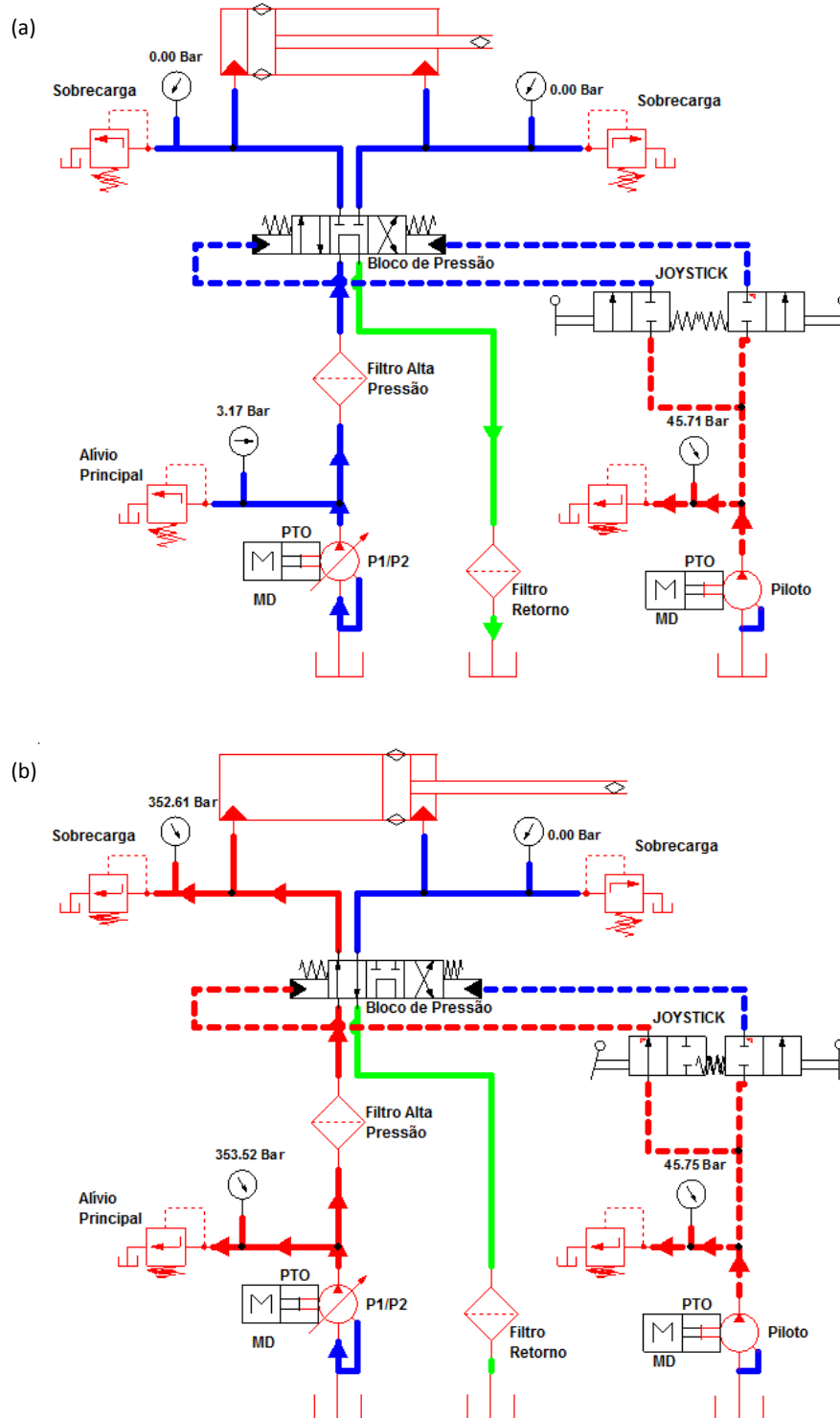


Figura 14 - Exemplo de sistema hidráulico de extensão de cilindro, (a) e (b).

Fonte: Ferreira (2015).

Na figura 15, retornando a válvula 2 vias da esquerda e acionando a da direita, a válvula 4 vias recebe pressão piloto, enviando óleo para o cilindro recolhendo sua haste e retornando fluido para o tanque.

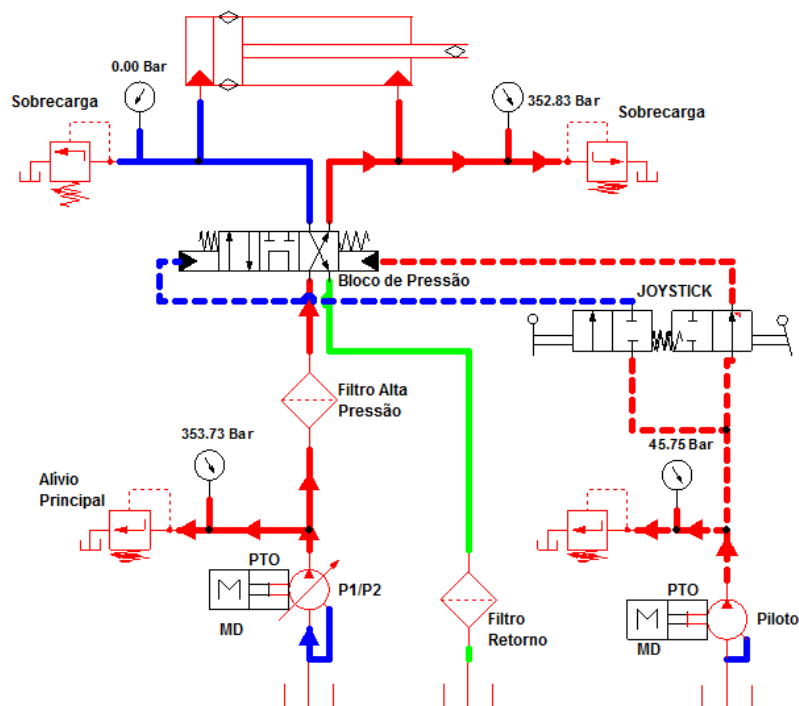


Figura 15 - Exemplo de sistema hidráulico de retorno de cilindro.

Fonte: Ferreira (2015).

### 2.3. FLUIDOS HIDRÁULICOS

Os fluidos hidráulicos são o meio para transferência de energia nos sistemas hidráulicos, portanto, através deles que a energia fornecida pela bomba de um sistema é transferida ao atuador. O projeto de componentes e sistemas requer conhecimento de agentes nocivos do ambiente para que possa ser efetuada a escolha adequada do fluido hidráulico que possa atender às condições de trabalho (LINSINGEN, 2013).

Segundo Stewart (1994), “A função de um bom fluido hidráulico é tripla: (1) é um meio transmissor de potência hidráulica; (2) é um meio lubrificador dos componentes do sistema de potência fluida; e (3) atua como vedador”.

O sistema hidráulico da escavadeira FZ-2399 utiliza bombas hidrostáticas, com dimensões compactas e que atingem pressões elevadas. Em decorrência disso, o fluido utilizado deve oferecer alta capacidade de lubrificação, capacidade de dissipar calor gerado pelos sistemas mecânicos, proteção contra ferrugem e corrosão, não formar sedimentos e gomas, estabilidade química e inércia química com materiais que está em contato. Além disso, o fluido deve promover boa vedação entre a câmara de alta e de baixa pressão de bombas e atuadores. Estes requerimentos são necessários para se evitar desgaste prematuro,

perda de desempenho dos componentes, vazamentos internos e altos custos de manutenção (LINSINGEN, 2013).

Neste trabalho foi focado o estudo no fluido hidráulico utilizado na escavadeira FZ-2399, que é um óleo de base mineral obtido a partir do refino de petróleo. Linsingen (2013) escreve que estes óleos são os mais utilizados em sistemas hidráulicos, devido à facilidade de obtenção e ao custo baixo.

Um óleo mineral puro não tem capacidade de manter satisfatoriamente suas propriedades durante a operação. Para manter as propriedades pouco alteradas durante o funcionamento da máquina bem como sua eficácia para o trabalho em uma vasta gama de condições, são adicionados a eles aditivos químicos, que têm o papel de adicionar alguma propriedade inexistente ao óleo e melhorar propriedades já existentes (BRUNETTI, 2013). Pode-se dizer que os óleos empregados em máquinas, de uma maneira geral, são constituídos de base e aditivos.

### 2.3.1. Propriedades dos fluidos hidráulicos

As principais propriedades dos fluidos hidráulicos que devem ser levadas em conta no projeto de sistemas, componentes e escolha do óleo são: densidade, viscosidade, índice de viscosidade, capacidade de lubrificação, estabilidade térmica, estabilidade à oxidação, estabilidade hidrolítica, tendência à formação de espuma, ponto de fluidez, ponto de fulgor e temperatura de ignição. Os fabricantes podem manipular estas propriedades por meio de aditivos químicos de acordo com o tipo de utilização que o óleo terá e a qual equipamento será destinado.

A **densidade**  $\rho$ , ou massa específica, não é uma propriedade exclusiva de fluidos, sendo aplicada em todas as formas de matéria. Esta propriedade, expressa por (9) é a razão entre a massa  $m$  pelo volume ocupado  $v$ .

$$\rho = \frac{m}{v} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (9)$$

A **viscosidade** é a medida da resistência do fluido ao escoamento. De uma maneira mais precisa, a viscosidade pode ser demonstrada numa ação de cisalhamento em um fluido entre duas placas paralelas com movimento relativo em certa distância, onde camadas de fluido deslizam uma em relação à outra. Chama-se de viscosidade absoluta  $\mu$  ou viscosidade dinâmica a razão entre a força de cisalhamento  $F$  e a velocidade  $V$  na qual o fluido está sendo cisalhado (STEWART, 1994). Brunetti (2013) afirma que a força para manter uma das placas

a uma velocidade constante será diretamente proporcional à área  $A$  e inversamente proporcional à distância  $h$  das placas, ou seja, a espessura da película de fluido. Na figura 16 este movimento de superfícies paralelas é mostrado.

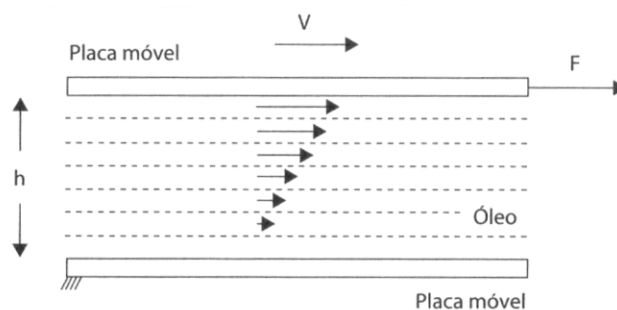


Figura 16 - Movimento de superfícies paralelas, separadas por uma camada de óleo.

Fonte: Brunetti (2013).

A relação entre a força de cisalhamento e a distância entre as superfícies é expressa da seguinte maneira:

$$F = \frac{\mu \cdot A \cdot V}{h} \quad [\text{N}] \quad (10)$$

Pela equação (10), a viscosidade absoluta é calculada:

$$\mu = \frac{F \cdot h}{A \cdot V} \quad \left[ \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} \right] \quad (11)$$

A viscosidade cinemática  $\nu$  é a viscosidade absoluta  $\mu$  dividida pela densidade  $\rho$ .

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \left[ \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right] \quad (12)$$

A unidade Stokes (St) é utilizada pela norma ISO 3448:1992 para expressar a viscosidade cinemática. Entretanto, é mais comum a utilização da forma centistokes (cSt) para a expressão da grandeza, em que 1 cSt é igual a 1 mm<sup>2</sup>/s, ou 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s.

A viscosidade é uma propriedade muito importante nos sistemas hidráulicos, pois o fluido deve atuar como vedador em bombas e atuadores. Além disso, esta propriedade é diretamente relacionada à lubrificação e à transmissão de potência (TESSMANN & HONG, 2000).

Stewart (1994) escreve que um fluido muito viscoso oferece muita resistência à passagem por válvulas e bombas, alto consumo de potência da bomba devido ao atrito do fluido, maior queda de pressão através do sistema prejudicando a realização de trabalho útil e movimentos lentos de atuadores e peças. Por outro lado, um fluido de viscosidade muito baixa causará mais vazamento interno em bombas e atuadores, prejudicando a vazão e eficiência do

sistema, menor pressão no sistema, aumento no desgaste devido ao rompimento de filme de óleo entre peças com movimento relativo, vazamentos em vedações e perda de controle devido à diminuição da resistência da película de fluido.

Sobre o **índice de viscosidade (IV)**, Noria Corporation (2002) mostra que esta propriedade mensura como a viscosidade varia com a temperatura. Fluidos com alto IV sofrem pouca variação de viscosidade em grandes variações de temperatura e fluidos com baixo IV sofrem maior variação de viscosidade com a temperatura. A escavadeira, quando começa a operar à temperatura ambiente precisa ter o desempenho do sistema hidráulico mais próximo possível de quando o óleo estiver circulando quente.

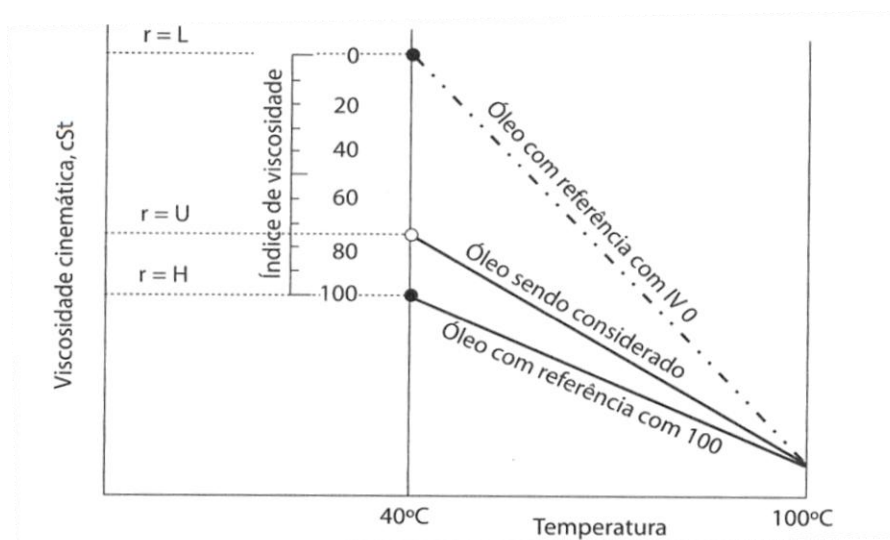


Figura 17 - Diagrama do índice de viscosidade.

Fonte: Brunetti (2013).

A **capacidade de lubrificação** reduz o atrito e desgaste entre duas superfícies em movimento relativo. O fluido deve ser capaz de manter um filme líquido aderido às superfícies e possuir estabilidade para resistir às tensões mecânicas internas devidas ao movimento relativo entre as superfícies sólidas (LINSINGEN, 2013).

**Estabilidade térmica** é a habilidade do fluido em resistir a reações químicas em altas temperaturas. A degradação do fluido pode ser acelerada por metais e outros materiais que podem agir como catalisadores (LINSINGEN, 2013).

**Estabilidade à oxidação** confere ao fluido a resistência em reagir com o oxigênio do ar atmosférico, evitando formação de compostos ácidos e corrosivos. Existem aditivos inibidores de oxidação que asseguram que o fluido não permaneça ácido por longos períodos. (LINSINGEN, 2013).

Segundo Stewart (1994), “A oxidação do óleo aumenta com o aumento da temperatura, pressão e agitação. A oxidação aumenta também com a contaminação por substâncias como graxa, sujeira, umidade, tintas e compostos para juntas”.

Ainda segundo Stewart (1994), quantidades indesejáveis de ar no sistema hidráulico podem ter como causas ar na linha de sucção de óleo, baixo nível do tanque, vazamentos em vedações. Condensação de água em bolhas de ar podem expor metais ferrosos à umidade, sendo altamente prejudicial.

A **estabilidade hidrolítica** é a resistência do fluido em resistir à reação com água. Se água invadir o sistema hidráulico, que pode acontecer por falha em vedações, sua condensação pode formar pequenas gotas suspensas no fluido prejudicando a capacidade de lubrificação e o desempenho do sistema. Aditivos desenvolvidos para isolar partículas de água das superfícies metálicas e inibidores de ferrugem são empregados para proteger os materiais ferrosos (LINSINGEN, 2013).

A **tendência à formação de espuma** corresponde à facilidade do fluido em reter bolhas de ar sem dissolvê-las, formando espuma, que são misturas ar e óleo que podem ocorrer devido a folgas por desgaste mecânico e vedação inadequada. A presença de ar não dissolvido reduz a capacidade lubrificante e o módulo de compressibilidade efetivo<sup>5</sup>, podendo contribuir para danos de cavitação (LINSINGEN, 2013). Num cilindro, por exemplo, o ar fora de solução é muito mais compressível que o óleo, fazendo com que a energia fornecida pela bomba seja utilizada para diminuir o volume das bolhas em proporção muito maior. Isto pode causar funcionamento irregular se uma quantidade considerável de ar tornar-se indissolúvel (STEWART, 1994).

Segundo Linsingen (2013), **compatibilidade** é a capacidade que o fluido deve possuir de resistir à reação com outros materiais que compõem os componentes do sistema hidráulico. O fluido deve ser compatível com borrachas sem deteriorá-las, não dissolver pinturas do interior de reservatórios e não liquefazer e amolecer elementos de vedação.

**Ponto de fluidez** é a menor temperatura na qual o fluido deixa de escoar. A temperatura nesta propriedade é um valor limite, devendo o sistema operar em uma temperatura substancialmente superior (LINSINGEN, 2013).

---

<sup>5</sup> Linsingen (2013) cita que módulo de compressibilidade efetivo é a medida de compressibilidade de um fluido com bolhas de gás misturadas. Devido à alta compressibilidade destas, a redução do volume da mistura de líquido com gás poderá ser substancial, dependendo da proporção entre líquido e gás.



O ponto de fluidez é importante na escolha do fluido a ser utilizado em sistemas colocados em baixas temperaturas. Segundo o autor, “o ponto mínimo de fluidez mais conveniente deve estar aproximadamente 11 °C abaixo da menor temperatura à qual o fluido será exposto.” (STEWART, 1994).

**Ponto de fulgor** é definido como a menor temperatura na qual o vapor desprendido do fluido entra em combustão. Esta propriedade mantém certa relação com a viscosidade, à medida que cresce com o aumento desta (LINSINGEN, 2013).

**Temperatura de ignição** é a temperatura na qual as gotículas do fluido aquecido suspensas no ar entram em combustão quando postas sobre uma superfície aquecida (LINSINGEN, 2013). O mesmo autor ainda cita que o rompimento de uma parte do sistema hidráulico pode provocar uma ejeção de fluido em forma de *spray*, que no caso de óleos minerais, é altamente combustível.

### 2.3.2. Classificação segundo a viscosidade

A viscosidade sofre grande variação com a temperatura. A classificação dos fluidos hidráulicos quanto à viscosidade é estabelecida pela norma ISO 3448:1992, que classifica o fluido pelo valor de viscosidade cinemática, à temperatura de 40 °C, como mostra a tabela 1, de acordo com a sequência numérica que define o Grupo Viscoso (VG) do fluido (LINSINGEN, 2013). Por exemplo, um óleo de  $\nu = 22$  cSt a 40 °C é ISO VG 22.

Tabela 1 - Diagrama de viscosidade ISO 3448:1992.

Número de viscosidade ISO (ISO VG)	Viscosidade cinemática média em cSt (mm <sup>2</sup> /s) a 40 °C	Limites de viscosidade cinemática em cSt a 40 °C	
		Mínimo	Máximo
2,00	2,20	1,98	2,42
3,00	3,20	2,88	3,52
5,00	4,60	4,14	5,06
7,00	6,80	6,12	7,48
10,00	10,00	9,00	11,00
15,00	15,00	13,50	16,50
22,00	22,00	19,80	24,20
32,00	32,00	28,80	35,20
46,00	46,00	41,40	50,60
68,00	68,00	61,20	74,80
100,00	100,00	90,00	110,00
150,00	150,00	135,00	165,00
220,00	220,00	198,00	242,00
320,00	320,00	288,00	352,00
460,00	460,00	414,00	506,00
680,00	680,00	612,00	748,00
1000,00	1000,00	900,00	1100,00
1500,00	1500,00	1350,00	1650,00

Fonte: Danfoss Hydraulics (1998).

### 2.3.3. Manutenção

A manutenção adequada do óleo hidráulico é importante para mantê-lo livre de contato de agentes externos, sejam eles químicos ou corpos estranhos. As propriedades dos fluidos podem ser alteradas se os devidos cuidados não forem tomados no armazenamento, transporte, manipulação e abastecimento nos reservatórios dos sistemas em que são utilizados.

Stewart (1994) cita os seguintes cuidados: os óleos devem ser guardados em recipientes limpos isentos de fibras ou resíduos, manter tampas e coberturas hermeticamente fechadas nestes recipientes, guardar o óleo em lugar seco, não misturar diferentes tipos de óleos hidráulicos para não haver problemas com as propriedades, usar fluido adequado para a bomba, utilizar recipientes limpos para transportar óleo do tanque de armazenamento para o reservatório, assegurar que o sistema está limpo antes de substituir o óleo não misturando óleo limpo ao óleo usado, fazer análises de amostras de óleo para verificação de contaminação e definir intervalos de troca de óleo de acordo com as condições de operação.

### 2.3.4. Fluido empregado na FZ-2399 pela U&M

O fluido hidráulico utilizado na escavadeira FZ-2399 pela U&M é o óleo mineral MHSE do fabricante P. Este óleo, segundo o fabricante, possui boa capacidade de lubrificação, estabilidade térmica, estabilidade à oxidação e antiferrugem. O fabricante da escavadeira, A, especifica o óleo hidráulico com viscosidade ISO VG 46. O MHSE é oferecido nesta viscosidade, como mostrado na tabela 2.

Tabela 2 - Dados do óleo hidráulico utilizado na FZ-2399.

Óleo MHSE dados de teste						
Grupo Viscoso		22	32	46	56	68
Viscosidade, mm <sup>2</sup> /s (cSt)	40 °C	21,8	32,2	46,0	55,7	68,2
	100 °C	4,64	6,05	7,53	8,42	9,37
Índice de Viscosidade		113	137	129	126	115
Ponto de ignição (°C)		216	250	260	262	264
Ponto de fulgor (°C)		-35	-32,5	-30	-27,5	-27,5

Fonte: Site do fabricante P<sup>6</sup>.

## 2.4. BOMBAS HIDRÁULICAS

Stewart (1994) escreve que um dispositivo de potência hidráulica tem como funções fornecer fluido sob pressão a um sistema hidráulico e a um lugar de armazenagem quando o

<sup>6</sup> Disponível em <[http://www.eneomotoroil.com/files/industrial/SHSE\\_Bulletin.pdf](http://www.eneomotoroil.com/files/industrial/SHSE_Bulletin.pdf)>. Acesso em: 16 mai. 2015.

óleo não estiver sendo utilizado. De acordo com Linsingen (2013), “a conversão de energia num sistema hidráulico é realizada por meio de bombas e motores hidráulicos”, sendo as bombas, segundo o mesmo autor, a unidade de conversão primária. Durfee e Sun (2009) citam que bombas hidráulicas convertem torque e velocidade de um eixo de entrada em pressão e vazão no fluido de saída.

#### **2.4.1. Princípio de funcionamento**

A bomba cria um vácuo parcial (pressão abaixo da atmosférica) na seção de entrada, quando o mecanismo interno inicia seu ciclo; então, a pressão atmosférica que atua no óleo do reservatório força-o para dentro da bomba (STEWART, 1994). Com a progressão do ciclo, a bomba força o fluido sob pressão para a saída.

A transformação da energia mecânica em energia hidráulica corresponde à adição de energia cinética e de pressão ao fluido. “Dependendo das características geométricas da máquina, tal transformação pode se dar com ênfase em uma ou outra forma” (LINSINGEN, 2013). Da mesma forma, nos motores a energia cinética e energia de pressão de um fluido são transformadas em energia mecânica.

Linsingen (2013) cita que as bombas que não permitem variação de vazão à rotação constante são máquinas de deslocamento fixo, e as bombas que permitem esta variação são as máquinas de deslocamento variável. A variação do deslocamento é feita por meio do aumento ou diminuição do volume de fluido admitido pela bomba em uma rotação, ou curso, de operação.

De acordo com Linsingen (2013), nas bombas hidrostáticas, ou de deslocamento positivo, a energia é transferida majoritariamente na forma de energia de pressão, tendo variação de energia cinética muito pequena em comparação à energia total transferida. Nas bombas de deslocamento positivo, existe boa vedação entre as câmaras de entrada e saída e se impõe-se uma resistência ao escoamento na saída da bomba, provocando uma elevação da pressão sem grande diminuição da vazão, gerando uma grande diferença de pressão entre a entrada e saída. De acordo com essas características, apenas as máquinas hidrostáticas são utilizadas nos sistemas hidráulicos das escavadeiras, devido à necessidade de se produzir altas pressões no fluido para operações de movimentação de grandes massas e deslocamento do veículo.

Os tipos construtivos de bombas referenciados neste trabalho são de deslocamento por engrenagens externas, pistões axiais e palhetas.

## 2.4.2. Tipos de bombas

As bombas aplicadas na escavadeira FZ-2399 são de deslocamento positivo, utilizadas para bombear óleo para o sistema hidráulico. O dispositivo de filtragem auxiliar adotado (o sistema de diálise *online*) possui uma bomba para mover o óleo, sendo esta de tipo construtivo diferente das utilizadas pela máquina. São mostrados os tipos de bombas utilizadas na máquina de escavação em estudo.

### 2.4.2.1. Bombas de pistões axiais

Pistões são alojados em furos cilíndricos usinados em um tambor também cilíndrico, e o movimento alternativo dos cilindros é conseguido por meio da rotação do tambor, acoplado a um eixo, em relação a um prato inclinado fixo. A separação entre regiões de entrada e saída é obtida através de uma placa chamada **placa de válvulas**, montada de forma fixa na carcaça. Como há movimento relativo entre tambor e a placa, é feita lubrificação por vazamento contínuo para a região de baixa pressão, que é o espaço entre o tambor e a carcaça, havendo necessidade de dreno externo (LINSINGEN, 2013).

Ajustando a inclinação  $\alpha$  do prato fixo, variamos o curso  $c$  do pistão, tendo-se uma bomba de deslocamento variável, pois o volume de fluido succionado será modificado (LINSINGEN, 2013). Esta bomba é ilustrada na figura 18.

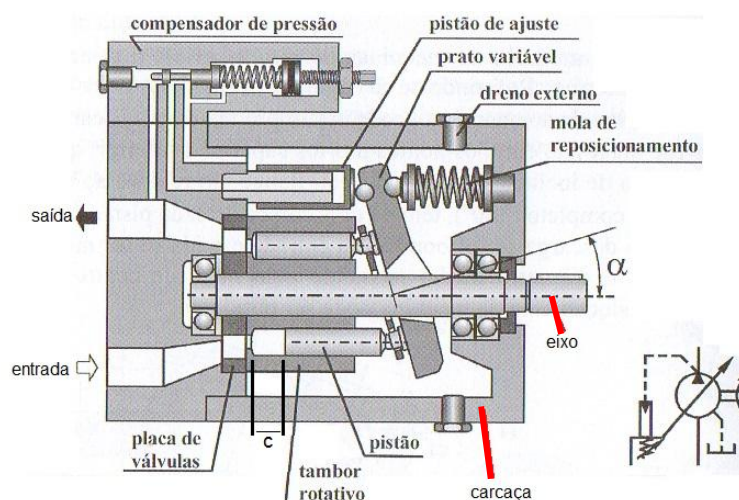


Figura 18 - Bomba de pistões axiais de prato inclinado de deslocamento variável.

Fonte: Linsingen (2013).

### 2.4.2.2. Bomba de engrenagens externas

Linsingen (2013) ensina que bombas de engrenagens externas são de deslocamento fixo e consistem de um par de engrenagens iguais em uma carcaça apropriada, com uma entrada e uma saída. Uma engrenagem é motora, que transmite movimento, é fixa ao eixo; enquanto que a outra engrenagem, a movida, é montada livre sobre outro eixo. A figura 19 mostra uma representação de uma bomba de engrenagens externas.

Stewart (1994) define que nesta bomba o fluido é carregado entre os dentes e a carcaça da bomba para o lado oposto deste. Quando as engrenagens engrenam-se, o óleo é forçado para a saída. Esta é uma ação de deslocamento positivo.

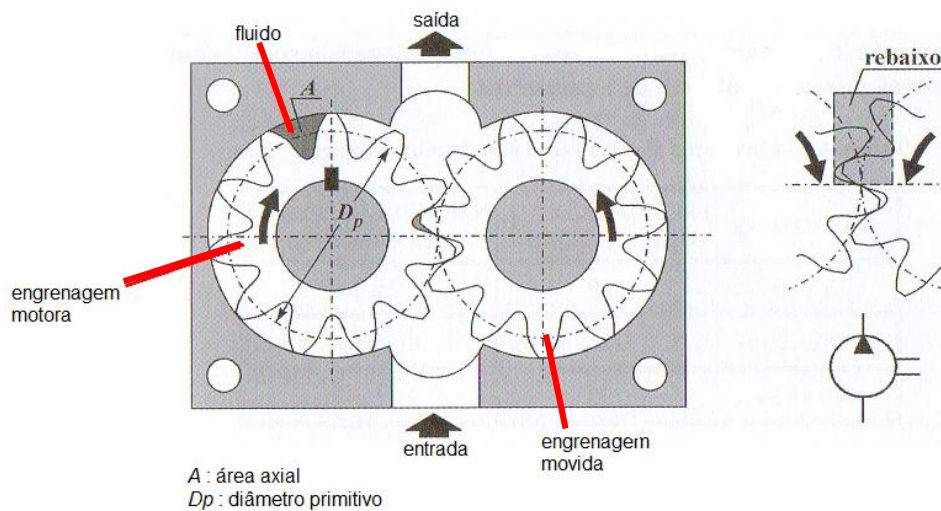


Figura 19 - Bomba de engrenagens externas.

Fonte: Linsingen (2013).

### 2.4.2.3. Bomba de palhetas móveis

A bomba de palhetas, ilustrada na figura 20, é basicamente constituída de um rotor cilíndrico com ranhuras onde palhetas retangulares móveis são encaixadas. Este conjunto se situa dentro de um anel estator montado numa carcaça fechada lateralmente por tampas. As palhetas são forçadas contra a superfície interna do estator por meio de força centrífuga ou força de mola (LINSINGEN, 2013).

De acordo com Stewart (1994), a bomba de palhetas é uma bomba rotativa e funciona dentro do princípio de criar vácuo na entrada por meio de uma cavidade que aumenta de volume, o que permite o preenchimento com fluido. À medida que o rotor gira, a cavidade diminui de volume e expulsa o óleo sob pressão.

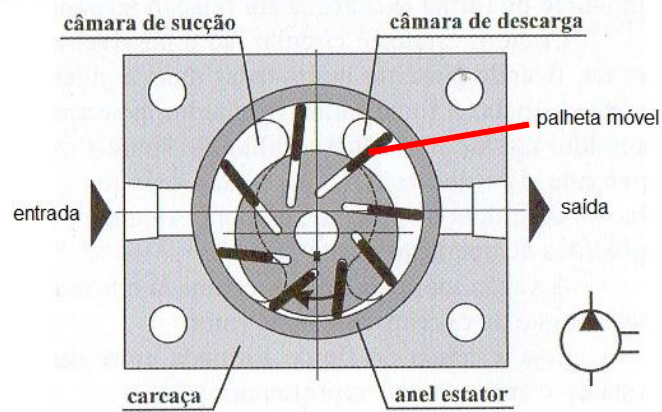


Figura 20 - Bomba de palhetas móveis.

Fonte: Linsingen (2013).

### 2.4.3. Aplicação na FZ-2399

As bombas hidráulicas presentes na FZ-2399 são as dos tipos de engrenagens externas e pistões axiais. Elas recebem energia mecânica proveniente de uma caixa de redução de engrenagens, chamada de grupo de bombas, ou PTO (*Power Train Output*), que recebe potência de eixo de um motor *Diesel*, mostrado na figura 21.



Figura 21 - Motor da FZ-2399 com seu PTO.

Fonte: U&M (2015).

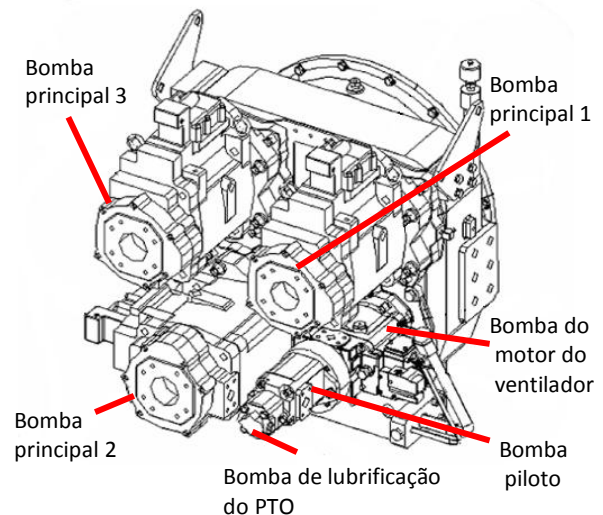


Figura 22 - Bombas ligadas ao PTO.

Fonte: Ferreira (2015).

Existem três bombas de pistões axiais idênticas conectadas ao PTO, cada uma engrenada paralelamente ao eixo de entrada da caixa e três bombas de engrenagens externas que compartilham um mesmo eixo de entrada. As bombas de pistões, ou **bombas principais**, são responsáveis por mover os atuadores dos implementos e de deslocamento e as bombas de

engrenagens, ou **auxiliares**, servem para, cada uma delas, mover os ventiladores dos trocadores de calor, gerar pressão para pilotagem das válvulas e bombear óleo de lubrificação do PTO. As bombas são indicadas na figura 22.

A figura 23 representa uma bomba de pistões axiais desmontada, utilizada na escavadeira. Nota-se a camisa de liga de cobre (Cu) nos furos do tambor rotativo, que sofre desgaste para proteger o pistão de aço inoxidável<sup>7</sup> sendo facilmente substituível.

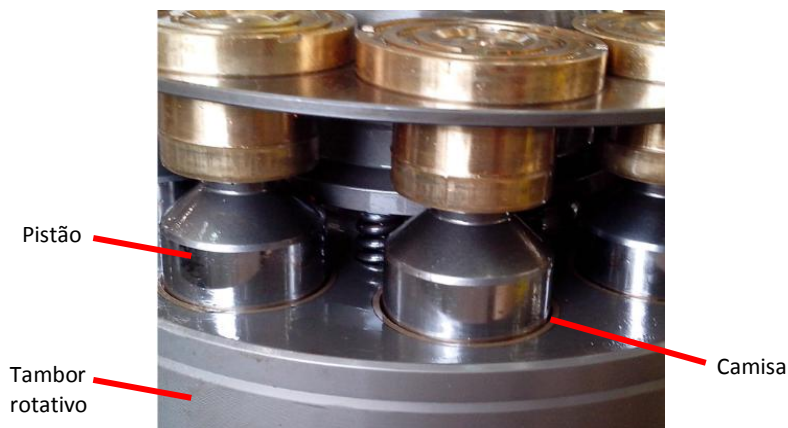


Figura 23 - Tambor e pistões de uma bomba de pistão axial.

Fonte: U&M (2015).

A aplicação da bomba de palhetas móveis está no sistema de diálise *online* instalado na máquina. Este sistema é apresentado no capítulo 3.

Não foi possível conseguir informações sobre as folgas existentes no interior das bombas devido ao fato de a U&M não ter disponíveis bombas para medição precisa e as medidas exatas serem dados internos do fabricante A.

## 2.5. ATUADORES HIDRÁULICOS

De acordo com Stewart (1994), o atuador é o dispositivo que converte energia do fluido em movimento mecânico, nos quais podem envolver movimento linear e/ou movimento rotativo. Atuadores são os elementos de conversão secundária.

<sup>7</sup> O autor Callister (2005) cita que os aços inoxidáveis possuem teor de cromo (Cr) de pelo menos 11%.



### 2.5.1. Método de operação

Segundo o texto de Noria Corporation (2002) os atuadores são o resultado final do princípio de Pascal e a conversão de energia hidráulica em energia mecânica é feita por meio de cilindros hidráulicos, que convertem energia de fluido em deslocamento linear; ou por meio de motores hidráulicos rotativos, que realizam a conversão de energia hidráulica em movimento rotacional.

### 2.5.2. Tipos de atuadores

Nas seções seguintes serão mostrados os tipos de atuadores hidráulicos utilizados na escavadeira em estudo, bem como seus princípios de funcionamento e características construtivas.

#### 2.5.2.1. Cilindros

Cilindros são atuadores constituídos de um pistão ligado a uma barra de seção circular, ou haste, inserido em uma carcaça cilíndrica, a camisa. Stewart (1994) cita que o fluido atua sobre o pistão no interior da camisa realizando trabalho retilíneo, cuja força atuante é resultado do produto da pressão do fluido bombeado para seu interior pela área do pistão. O cilindro hidráulico é ilustrado na figura 24.

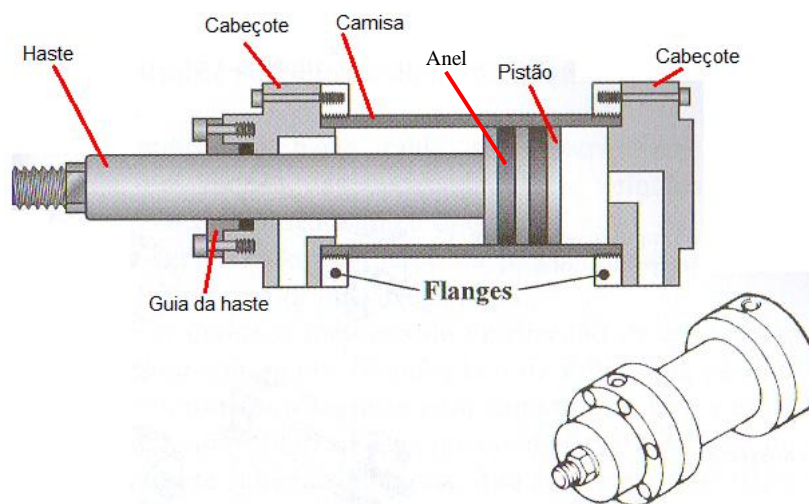


Figura 24 - Cilindro hidráulico

Fonte: Linsingen (2013).



Linsingen (2013) escreve que a camisa do cilindro normalmente é feita de aço SAE 1020 a SAE 1045, com acabamento interno feito por brunimento, que mantém a rugosidade superficial inferior a  $1,0 \mu\text{m}$ . A haste é fabricada em aço SAE 1040 a SAE 1070, com um acabamento superficial de rugosidade inferior a  $0,4 \mu\text{m}$ . Para aplicações sujeitas à corrosão, utiliza-se revestimento de cromo duro com espessura entre 10 a  $20 \mu\text{m}$ . O revestimento é feito com aço inoxidável.

O pistão é geralmente fabricado de ferro fundido cinzento, possuindo ranhuras onde são encaixadas vedações (LINSINGEN, 2013).

Segundo Linsingen (2013), no cilindro de duplo efeito, esquematizado na figura 25, a energia de fluido é efetiva em ambos os lados do cilindro, exercendo o movimento da haste tanto no avanço quanto no retorno. Durfee e Sun (2009) alegam que cilindros de duplo efeito são mais comuns em aplicações hidráulicas. A escavadeira FZ-2399 utiliza apenas cilindros deste tipo, pela necessidade de operação cíclica.

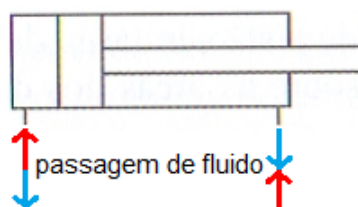


Figura 25 - Cilindro de duplo efeito.

Fonte: Linsingen (2013).

#### 2.5.2.2. Motores rotativos

Os motores rotativos basicamente funcionam como o inverso das bombas e têm construção similar a estas (STEWART, 1994). A energia hidráulica é convertida em energia mecânica rotacional através da entrada de fluido em alta pressão que impulsiona um conjunto rotativo ligado a um eixo (DURFEE & SUN, 2009).

Apenas o motor de pistões axiais é tratado no trabalho, ilustrado na figura 26, utilizado na escavadeira FZ-2399. Linsingen (2013) explica que “por se tratar de motor, o movimento rotativo do eixo é produzido pelo comportamento oscilatório do prato, em decorrência do movimento alternativo dos pistões nos cilindros do tambor fixado à carcaça.”.

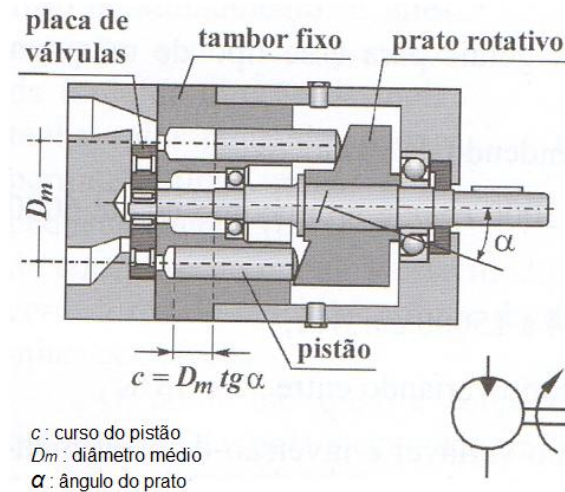


Figura 26 - Motor de pistões axiais.

Fonte: Linsingen (2013).

Além do motor rotativo de prato oscilante inclinado, existe o motor de eixo inclinado, mostrado na figura 27. Segundo Stewart (1994), neste motor o óleo força o pistão para fora, fazendo girar o eixo de saída.

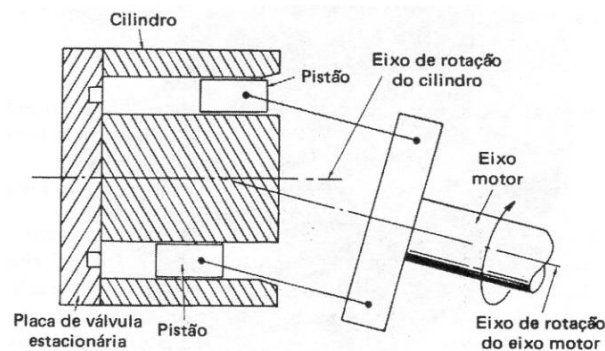


Figura 27 - Motor de pistões de eixo inclinado.

Fonte: Stewart (1994).

### 2.5.3. Aplicação na FZ-2399

O movimento do conjunto de concha, semibraço e braço da escavadeira é produzido por cilindros hidráulicos de dupla ação, que operam estendendo e recolhendo a haste. No cilindro que opera a concha, há injeção de óleo hidráulico em um lado do pistão para estender a haste e retorno de óleo do outro lado para o tanque. Nos demais cilindros, o mesmo processo ocorre. O cilindro pode ser visto na figura 28.



Figura 28 - Cilindro da FZ-2399.

Fonte: U&M (2015).

No pistão do cilindro, como mostra a figura 29, são encaixados anéis não metálicos que servirão de guias para o movimento e anéis para desgaste e posterior substituição. Estes anéis são importantes para não haver contato de metal com metal de camisa com o pistão. No centro do pistão, a região com revestimento de liga com cobre (Cu), é encaixada uma vedação feita de material elastômero que separa a região de alta pressão e de baixa pressão.

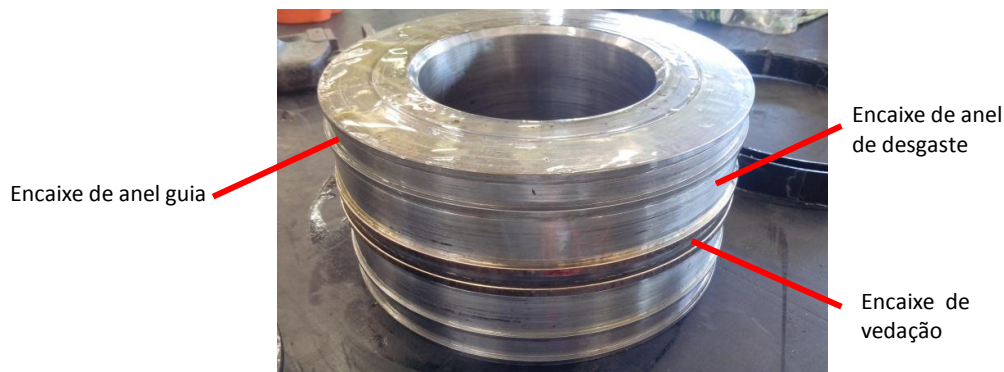


Figura 29 - Pistão de cilindro da FZ-2399.

Fonte: U&M (2015).

Os motores hidráulicos utilizados para o deslocamento da máquina mostrados na figura 30 (ilustrativa, devido à indisponibilidade da peça da FZ-2399, que possui montagem idêntica) e giro da estrutura superior, mostrados na figura 31, conectados cada um a uma caixa de redução (comandos finais e comandos de giro, respectivamente), são de pistões axiais. Os motores podem ter rotação invertida, por meio da inversão da injeção e saída de óleo hidráulico.

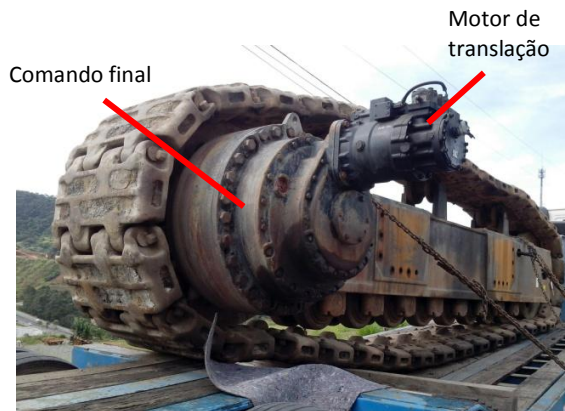


Figura 30 - Motor de translação e comando final.

Fonte: U&M (2015).

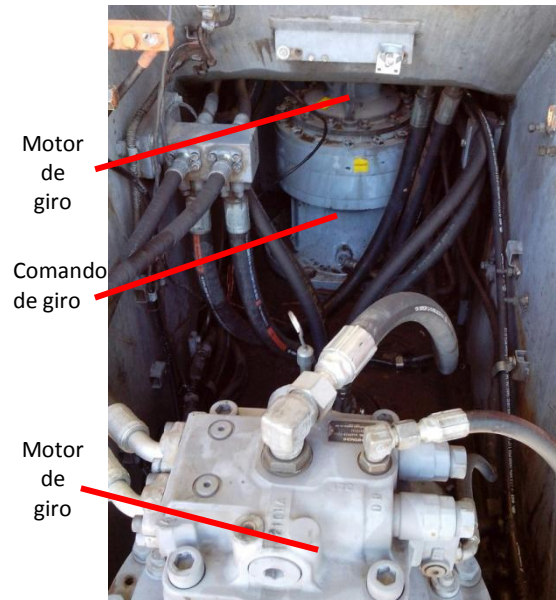


Figura 31 - Motores e um comando de giro.

Fonte: U&M (2015).

Os ventiladores dos trocadores de calor da escavadeira recebem energia mecânica de motores de pistões axiais de eixo inclinado, que são supridos pelo fluido hidráulico. A figura 32 indica a posição destes atuadores.

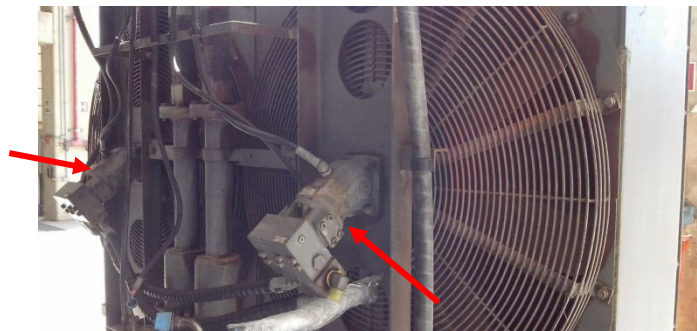


Figura 32 - Motores dos ventiladores.

Fonte: U&M (2015).

## 2.6. VÁLVULAS

O fluido pressurizado contido numa linha deve ter sua energia controlada e passagem liberada para os atuadores por algum dispositivo. Além disso, a pressão do fluido deve ser controlada, para não haver risco de sobrepessão e danos no sistema. Os dispositivos responsáveis por estas tarefas são as válvulas.

### **2.6.1. Descrição do componente**

Linsingen (2013) cita que a limitação e/ou controle de energia nos sistemas hidráulicos é realizada pelas válvulas, que alteram a vazão e/ou pressão na linha e operam variando a área de um orifício de passagem de fluido.

Stewart (1994) ensina que válvula de controle direcional dirige o movimento do fluido para um local específico de maneira que possa realizar trabalho. Stewart (1994) ainda menciona que as válvulas que controlam as pressões no sistema são as válvulas de controle de pressão.

De acordo com Linsingen (2013), os orifícios variáveis são constituídos basicamente por um orifício e um obturador responsável pelo ajuste do valor de área da restrição de passagem. Estes elementos de válvulas têm características geométricas que permitem classificá-los como elementos deslizantes e elementos de assento.

### **2.6.2. Tipos de elementos de válvulas**

Os dois tipos de elementos de válvulas são: elementos deslizantes e elementos de assento.

#### **2.6.2.1. Válvulas com elementos deslizantes**

Segundo Linsingen (2013), a válvula de elemento deslizante é constituída de um obturador móvel cilíndrico que desliza no interior de um bloco perfurado contendo furos ou rebaixos circunferenciais ligados a pórticos. Podem ser usadas em válvulas direcionais e válvulas de controle proporcional.

O tipo de elemento deslizante considerado neste trabalho e utilizado na escavadeira FZ-2399 é o carretel deslizante. Linsingen (2013) ainda cita que “o carretel [...] pode assumir infinitas posições entre o fechamento e a abertura totais, ou se movimentar com deslocamento ou velocidade controlados por funções preestabelecidas”. Isto significa tratar o orifício como um elemento de controle proporcional. Além disto, o carretel pode ser usado como totalmente fechado ou aberto. A figura 33 ilustra este tipo de elemento.

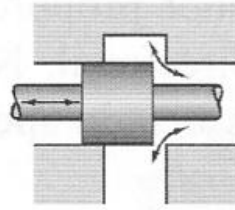


Figura 33 - Carretel deslizante.

Fonte: Linsingen (2013).

Devido à forma construtiva dos carretéis, o movimento relativo entre o obturador e seu guia, que pode ser o próprio corpo da válvula, implica a existência de folgas, que leva a vazamentos internos e possibilidade de travamento por partículas sólidas contaminantes presentes no fluido (LINSINGEN, 2013).

#### 2.6.2.2. Válvulas com elementos de assento

Linsingen (2013) cita que as válvulas de assento são normalmente fechadas e a pressão de entrada é ajustada por força de mola, a válvula só abre quando a força devida à pressão na entrada superar a força da mola. Uma vantagem deste tipo de elemento é não ter vazamentos internos operando em altas pressões. Podem ser usadas para limitação de pressão e para serem unidirecionais. A FZ-2399 utiliza válvula de assento de tipo cônica para limitação de pressão, nas chamadas válvulas de alívio. Este tipo é ilustrado na figura 34.

As válvulas de alívio servem para limitar a pressão do sistema, sendo assim dispositivos de segurança. Estas válvulas também são utilizadas em filtros, atuando quando o elemento filtrante torna-se excessivamente obstruído. Com isso, a pressão diferencial aumenta. Para não haver ruptura do meio filtrante, uma válvula de alívio montada paralelamente ao filtro abre, permitindo a passagem de fluido não filtrado. Esta é chamada **válvula de bypass**, esquematizada na figura 35.

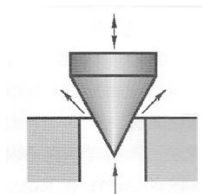


Figura 34 - Elemento de assento cônico.

Fonte: Linsingen (2013).

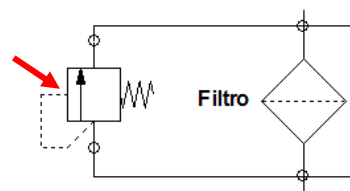


Figura 35 - Válvula de bypass (indicada).



### 2.6.3. Aplicação na FZ-2399

A escavadeira utilizada pela U&M possui dois blocos de válvulas tipo carretel deslizante, responsáveis por controlar a passagem de óleo para os implementos e motores de translação. As figuras 36 e 37 mostram os blocos e a figura 38 apresenta os carretéis.

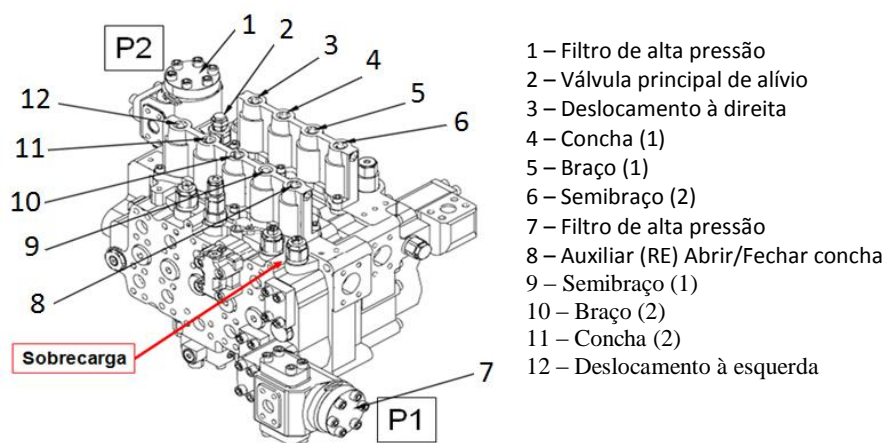


Figura 36 - Bloco de válvulas de controle principal, de nove válvulas carretel, ligado às bombas principais 1 e 2.

Fonte: Ferreira (2015).

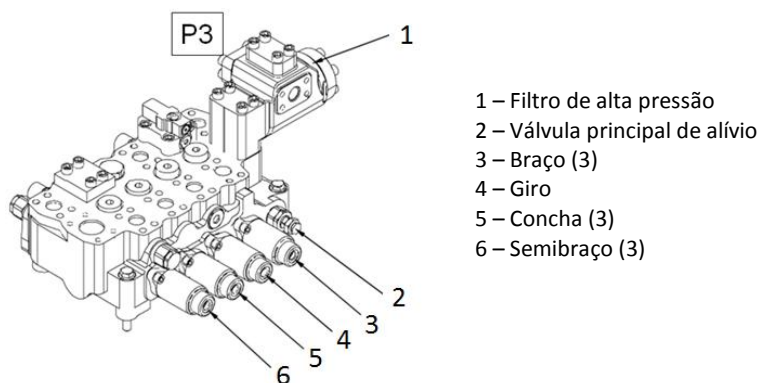


Figura 37 - Bloco de válvulas de controle de giro, de quatro válvulas carretel, ligado à bomba principal 3.

Fonte: Ferreira (2015).

Estes blocos possuem válvulas limitadoras de pressão de elemento cônico chamadas de válvulas de alívio principais, representadas pela figura 39, que limitam a pressão do fluido proveniente das bombas principais. Se a pressão do óleo atingir certo valor, a válvula de alívio abre, controlando a pressão retornando parte do óleo para o tanque hidráulico.



Figura 38 - Carretéis das válvulas.

Fonte: Ferreira (2015).

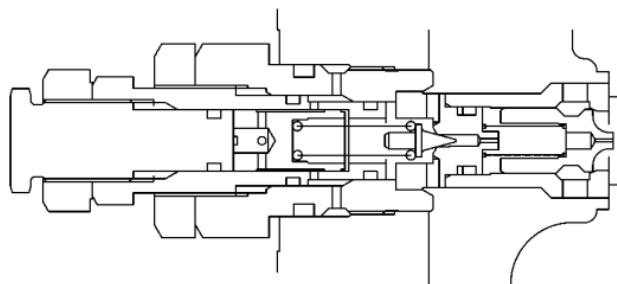


Figura 39 - Válvula de alívio principal.

Fonte: Ferreira (2015).

## 2.7. ATRITO, DANOS EM SUPERFÍCIES E LUBRIFICAÇÃO

Os sistemas hidráulicos são constituídos de diversos componentes formados por peças em constante movimento, estando sujeitos a desgaste e demais danos. As bombas apresentam movimento relativo entre carcaça e elemento impulsor, necessitando de redução de atrito entre peças com espaços muito pequenos entre si. Nos atuadores acontece o mesmo, com o movimento do pistão no interior do cilindro e nos motores com atuação análoga à das bombas. Portanto, o fluido hidráulico tem importante função lubrificante, reduzindo atrito e minimizando o desgaste.

Quando duas superfícies se movem em contato ou separadas com algum material fluido, uma em relação à outra, haverá uma força contrária a esse movimento chamada de atrito, ou resistência ao movimento. Existem dois tipos de atrito, o sólido e o fluido. No atrito sólido existe contato direto entre duas superfícies. No atrito fluido, uma camada fluida (líquida ou gasosa) contínua separa as duas superfícies em movimento. O fluido que forma esta camada é chamado de lubrificante (MOURA & CARRETEIRO, 1987). O atrito em sistemas hidráulicos consome energia e promove desgaste, por isso deve ser reduzido ao máximo.

As superfícies internas em contato com fluido podem sofrer também por danos não relacionados a contato sólido. A cavitação é o fenômeno que ocorre com a interação de fluido e superfície, em que ondas de pressão formadas pela ruptura de bolhas de gás ou cavidades no fluido colidem próximas à superfície, provocando danos (JUVINALL & MARSHEK, 2013).

O desgaste e demais agressões ao material de uma superfície geram partículas que se tornam agentes nocivos à integridade e à vida útil de componentes do sistema hidráulico. O aumento da temperatura reduz a viscosidade dos fluidos líquidos lubrificantes, aumentando o



desgaste, devido à falta de uma forte película de óleo entre as peças mecânicas em movimento relativo (STEWART, 1994).

### 2.7.1. Causas do atrito

Mesmo as superfícies mais polidas e acabadas apresentam irregularidades e asperezas. Segundo Blau et al (1992), “a forma geométrica de qualquer superfície é determinada pelo processo de acabamento utilizado para produzi-la”. Existem ondulações com tamanhos que irão desde as dimensões atômicas até o comprimento total da peça, sendo isto resultado de processos de acabamento ou máquinas utilizadas para este fim. A figura 40 ilustra esquematicamente as irregularidades presentes nas superfícies.

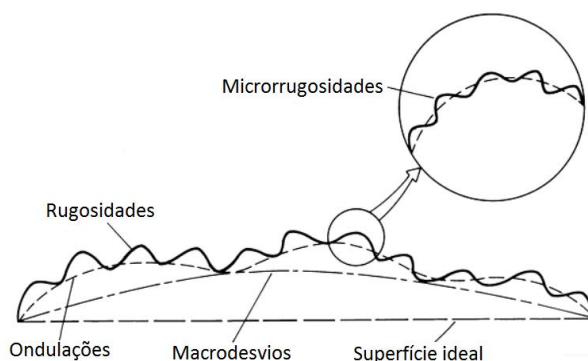


Figura 40 - Irregularidades em uma superfície.

Fonte: Blau et al (1992).

A maneira com que se relacionam as superfícies caracteriza os mecanismos de atrito: cisalhamento e adesão (MOURA & CARRETEIRO, 1987).

#### 2.7.1.1. Cisalhamento

Blau et al (1992) escrevem que os picos das rugosidades, ou asperezas, são o primeiro ponto de interesse em superfícies em movimento cisalhante (ou tangencial) e desgaste de materiais, pois isto envolve contato de asperezas de uma superfície com as de outra ou as asperezas de uma superfície com outra superfície com alto grau de polimento.

Segundo Moura & Carretero (1987), quando picos de duas superfícies são forçados lateralmente entre si, em movimento cisalhante, o atrito e o desgaste se desenvolvem pela resistência oferecida pelo sólido ao rompimento destes picos. Se ambas as superfícies têm durezas semelhantes, ambos os picos em contato se romperão, mas se houver diferença

considerável de dureza, os picos da superfície dura se comportarão como uma ferramenta de corte, danificando a menos dura. Estes efeitos são mostrados na figura 41.

### 2.7.1.2. Adesão

Se as superfícies em contato possuem pequenas áreas relativamente planas no lugar de picos, ilustrado na figura 42, ocorre soldagem a frio destas áreas em contato com presença de carregamento. Esta é a maior responsável pela resistência ao movimento (MOURA & CARRETEIRO, 1987).

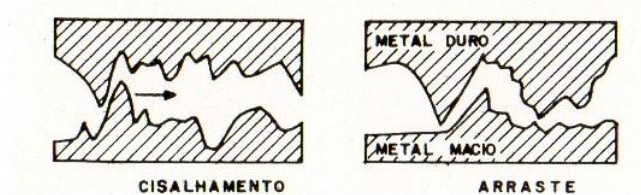


Figura 41 - Superfície de material macio sendo danificada.

Fonte: Moura & Carreteiro (1987).



Figura 42 - Soldagem de duas superfícies pressionadas.

Fonte: Moura & Carreteiro (1987).

## 2.7.2. Tipos de danos em superfícies

Pelo método de funcionamento dos componentes dos sistemas hidráulicos e objetivo do trabalho, pode-se abordar três tipos de danos: o desgaste adesivo, desgaste abrasivo e cavitação.

### 2.7.2.1. Desgaste abrasivo

Blau et al (1992) citam que desgaste abrasivo ocorre quando partículas ou saliências de alta dureza são forçadas e se movem ao longo de uma superfície sólida mais macia, ocasionando perda progressiva de material. Quando duas superfícies entram em contato, ambas estão sujeitas a desgaste abrasivo.

Ainda de acordo com Blau et al (1992), os contatos incluem desgaste a dois corpos e desgaste a três corpos, como mostra a figura 43. O primeiro acontece quando uma superfície abrasiva desliza sobre outra. O segundo modo ocorre quando uma partícula abrasiva é capturada e se situa entre duas superfícies em movimento relativo. Desgaste a dois corpos proporcionam de 10 a 1000 vezes mais perda de material do que o a três corpos.

### 2.7.2.2. Desgaste adesivo

Se a pressão de contato for alta, a camada de óxido das duas superfícies será rompida gerando contato metal com metal, em regiões de contato pequenas. Isto poderá ocasionar a adesão destes pontos em contato (BLAU et al, 1992). Burakowski & Wierzchon (1999) definem que o desgaste adesivo é resultado da remoção de pontos fundidos de uma das superfícies e o transporte de partículas daquela para outra.

Segundo Juvinall & Marshek (2013), ocorrendo soldagem de duas asperezas, uma delas falhará por cisalhamento, permitindo que o movimento relativo continue e sucessivas soldas e fraturas. O desgaste adesivo é esquematizado na figura 44. Quando metais semelhantes são atritados entre si, as condições se tornam ideais para a soldagem das asperezas. Por isso, metais idênticos ou metalurgicamente similares geralmente não devem ser utilizados juntos sob condições que causem problemas de desgaste.

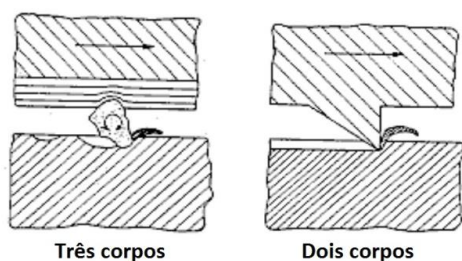


Figura 43 - Desgaste a três corpos e dois corpos.

Fonte: Hutchings (1992).

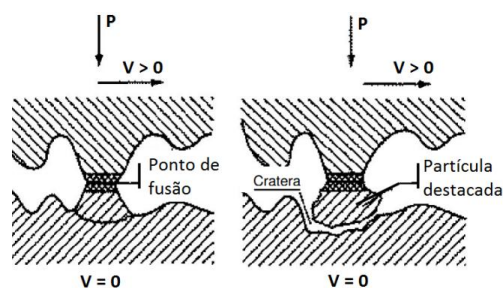


Figura 44 - Desgaste adesivo.

Fonte: Burakowski & Wierzchon (1999).

Ainda de acordo com Juvinall & Marshek (2013), partículas de óxido perdidas e partículas de metal transferidas de uma superfície para a outra causam ainda mais desgaste da superfície por causa da abrasão.

### 2.7.2.3. Cavitação

Juvinall & Marshek (2013) citam que a cavitação se caracteriza pela formação de bolhas de gás ou “cavidades” no fluido que se move em relação a uma superfície sólida em suas vizinhanças. Estas bolhas se formam quando a pressão do líquido cai abaixo de sua pressão de vapor. Blau et al (1992) detalham que as bolhas são transportadas pelo fluxo de fluido e quando atingem uma região de alta pressão, elas se tornam instáveis e colapsam, provocando ondas de pressão que podem causar deformação local e remoção de material da

superfície sólida vizinha, exemplificada pela figura 45. A cavitação pode ocorrer em tubulações, bombas e válvulas, sendo este fenômeno de grande preocupação em sistemas hidráulicos.

A aparência de uma área danificada por cavitação é rugosa e nos casos mais severos, significativa quantidade de material é removida, dando à superfície uma textura porosa. O meio mais efetivo de reduzir a cavitação é aumentar a dureza do material de superfície. O aço inoxidável é normalmente o material mais efetivo disponível a custo acessível (JUVINALL & MARSHEK, 2013).

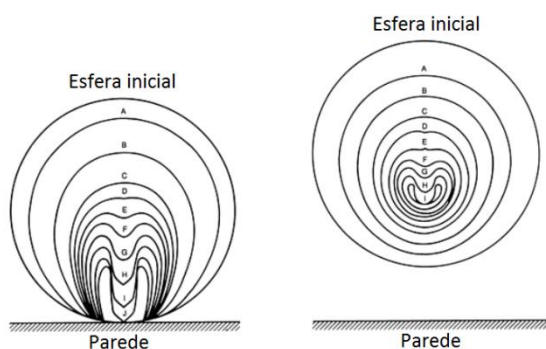


Figura 45 - Esquema do colapso de uma bolha de gás em um líquido.

Fonte: Blau et al (1992).

### 2.7.3. Lubrificação

Blau et al (1992) escrevem que lubrificação é introduzida entre dois sólidos em deslizamento, adicionando líquido, gás ou um lubrificante sólido entre os corpos com intenção de se diminuir o atrito e desgaste, promover dissipação de calor e afastar partículas de desgaste resultantes do deslizamento. Moura & Carreteiro (1987) citam que a resistência dos fluidos ao deslocamento é muito menor que as forças de cisalhamento e adesão. Este trabalho considera apenas a lubrificação utilizando lubrificantes líquidos.

Três regimes de lubrificação são considerados: hidrodinâmica, hidrostática e limítrofe.

#### 2.7.3.1. Lubrificação hidrodinâmica

Segundo Moura & Carreteiro (1987), na lubrificação hidrodinâmica há a total separação das superfícies em movimento relativo, na qual a o filme de fluido se desenvolve em razão do próprio movimento. Teoricamente, não há desgaste, uma vez que as superfícies

nunca entram em contato. Na prática, não há lubrificação totalmente hidrodinâmica. O atrito varia em função da viscosidade, das superfícies em contato, da velocidade relativa, da área das superfícies, da espessura do filme fluido, da forma geométrica das superfícies e da carga  $P$  exercida sobre o filme. A viscosidade é um fator crítico, pois quanto mais viscoso é o lubrificante, maior a espessura do filme.

De acordo com Moura & Carreiro (1987), o filme fluido se desenvolve em superfícies que não sejam paralelas. Utilizando um bloco como modelo, para a correta lubrificação hidrodinâmica, a borda que avança deve ser arredondada, o bloco deve permitir inclinação com a superfície plana e o projeto do bloco deve fornecer uma boa área para flutuação no fluido. A figura 46 ilustra este modelo do bloco.

É dito pelos mesmos autores que o bloco ao iniciar o movimento, devido à força  $F$ , existe contato de metal com metal, até que a borda arredondada encontre o lubrificante e uma camada permanece na superfície inferior do bloco, permitindo seu deslocamento até que a quantidade de fluido que entra abaixo do bloco seja igual à quantidade que sai. O bloco é então sustentado pela pressão  $p$  hidrodinâmica do lubrificante.

#### 2.7.3.2. Lubrificação hidrostática

Segundo Blau et al (1992), na ausência de velocidade suficiente para criar o filme lubrificante da lubrificação hidrodinâmica, o filme é gerado por óleo altamente pressurizado para gerar a camada lubrificante. Juvinal & Marshek (2013) complementam que há completa separação das superfícies, mesmo sem movimento relativo, tendo como vantagem o atrito muito baixo o tempo todo, incluindo em operações de baixa velocidade e partida.

#### 2.7.3.3. Lubrificação limítrofe

A lubrificação limítrofe, de acordo com Moura & Carreiro (1987), possui uma película de lubrificante bastante delgada. A oleosidade do lubrificante é de grande importância, pois ele deve ter grande afinidade química com as moléculas do óleo e com a liga metálica a lubrificar. Juvinal & Marshek (2013) mencionam que neste regime a superfície em contato é contínua e extensiva, entretanto tendo o lubrificante continuamente “untado”. Blau et al (1992) escrevem que em uma camada muito fina de lubrificante, a adsorção é segunda defesa contra o contato metal com metal, onde moléculas polares do óleo ficam aderidas à superfície.

A figura 47 ilustra a lubrificação limítrofe. Existe uma tensão de cisalhamento  $S_m$  no ponto de contato das superfícies.

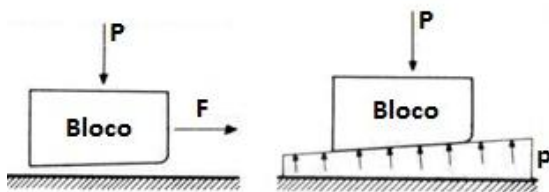


Figura 46 - Lubrificação hidrodinâmica em um bloco deslizante.

Fonte: Moura & Carreteiro (1987).

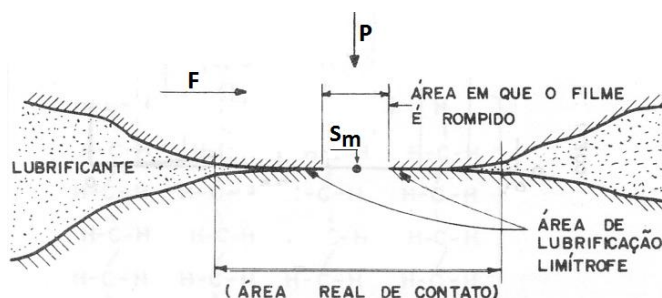


Figura 47 - Lubrificação limítrofe.

Fonte: Moura & Carreteiro (1987).

#### 2.7.4. Potenciais danos no sistema hidráulico da FZ-2399

Profissionais da U&M alegam que a contaminação presente no sistema hidráulico pode causar desgaste abrasivo nas bombas principais. Partículas afetam as camisas de liga de cobre dos cilindros, aumentando a contaminação no sistema com partículas metálicas. O aumento na contaminação gera ainda mais desgaste por abrasão. Mesmo com a filtragem do sistema, os contaminantes sólidos podem atravessar os elementos filtradores e atingir outros componentes, como o bloco de válvulas tipo carretel. As partículas podem acumular nas folgas entre os carretéis e o bloco, causando travamento, ou *silt lock*.

O desgaste e demais danos dos anéis guia e os anéis de desgaste dos pistões dos cilindros colocam em contato direto o pistão e a camisa, metal com metal e com área menor, tendo a lubrificação hidrodinâmica prejudicada. Isto causa aumento de fricção e desgaste abrasivo, gerando mais contaminação no sistema por partículas metálicas.

Cavitação em bombas também é relatada por profissionais da U&M, que pode ser causada por presença de ar nas bombas, baixo nível de óleo no tanque hidráulico ou pressão de sucção muito baixa. Queda de pressão excessiva no filtro de sucção baixa muito a pressão na entrada das bombas, propiciando cavitação. O dano é mostrado na figura 48.



Figura 48 - Cavitação em placa de válvulas.

Fonte: U&M (2015).

## 2.8. CONTAMINAÇÃO E FILTRAGEM

Os sistemas hidráulicos devem operar de maneira mais próxima possível ao planejado em projeto e em condições sempre favoráveis para se atingir longa vida útil e produtividade desejada, evitando tempo de inatividade e reparos. Limpeza de fluido a fim de se evitar partículas contaminantes são fatores indispensáveis ao que tange a vida útil e confiabilidade dos sistemas hidráulicos. O campo de conhecimento acerca de filtragem e controle de limpeza de fluido é denominado **controle de contaminação** (TESSMANN & HONG, 2000).

Tessmann & Hong (2000) enumeram cinco áreas que envolvem o controle de contaminação: a identificação, que é o reconhecimento e descrição de vários contaminantes; análise, que caracteriza e quantifica os contaminantes; exclusão, que engloba a prevenção da contaminação de penetrar no fluido do sistema; filtragem, à qual inclui a captura e retenção de partículas que entraram no fluido e a tolerância do componente, que inclui a avaliação e melhorias da capacidade do componente em trabalhar e resistir ao ataque de contaminação particulada.

Ainda segundo Tessmann & Hong (2000), não sendo possível cumprir a etapa da exclusão no controle de contaminação, deve-se utilizar um meio de conter as partículas que adentraram no sistema. Para isto, precisa-se fazer filtragem do fluido hidráulico, com finalidade de reter os contaminantes. Se a filtragem não atingir determinado patamar aceitável, o componente terá que ter uma vida útil suficientemente longa com o nível de contaminação resultante.

A contaminação de um óleo pode ser mensurada por meio da norma ISO 4406:1999, que considera a contagem das partículas e a medição de diferentes tamanhos de partículas presentes, estabelecendo-se um código numérico que representa estes parâmetros.



### 2.8.1. Partículas contaminantes

De acordo com Tessmann & Hong (2000), partículas contaminantes são porções de matéria muito pequenas, sendo elas fatores críticos em todas as superfícies em movimento relativo. Estas partículas existem em vários formatos e tamanhos, geralmente são descritas pelas suas propriedades físicas, estruturas, tamanhos e distribuição de tamanhos.

#### 2.8.1.1. Origem da contaminação

Tessmann & Hong (2000) dizem que partículas contaminantes podem surgir no sistema em um de três meios primários, nos próximos três parágrafos.

A contaminação presente nas peças durante a fabricação, como fibras de estopas usadas em limpeza e partículas provenientes de processos de fabricação, como cavacos de usinagem, respingos de solda e pó de lixamento.

Existe a contaminação ingressada, que tem origem no ambiente externo, como a poeira. Quando o cilindro de dupla ação opera, há sucção de ar do meio ambiente pelo tanque. O volume de óleo dentro do cilindro do lado da haste é menor que o volume do lado oposto. Quando a haste é estendida, o volume de fluido que entrará no cilindro será maior do que o volume que retornará para o tanque pelo lado da haste. Isto faz o nível de óleo baixar criando um vácuo no reservatório, sendo necessária a pressurização do compartimento com ar por meio de um respiro. Se o ar introduzido não for filtrado adequadamente, partículas contaminantes podem ingressar e atingir o óleo. Parker (2006) enumera outros meios para ingresso de contaminação, como em vedações e tampas mal encaixadas.

Inclui-se a contaminação gerada por desgaste, formada por partículas de desgaste compostas de material pertencentes a superfícies em movimento relativo. Parker (2006) explica que partículas propiciam a formação de mais partículas, num processo de desgaste abrasivo, contribuindo para o aumento da contaminação e conseqüentemente, da abrasão.

Parker (2006) cita outra origem, a contaminação natural, que agrega a limpeza do óleo hidráulico novo. Apesar dos cuidados de limpeza do óleo na fabricação, o transporte e distribuição podem contaminá-lo.



### 2.8.1.2. Efeitos da contaminação

De acordo com os autores Tessmann & Hong (2000), “o efeito primário da contaminação particulada é acelerar a destruição das superfícies de trabalho em movimento relativo.”. O autor da citação anterior escreve que “a destruição das superfícies de trabalho por influência das partículas contaminantes é chamada abrasão de três corpos como um processo, e desgaste por contaminação como um resultado”.

Segundo Parker (2006), cerca de 70% a 80% das falhas em sistemas acontecem por causa de partículas contaminantes, portanto monitoramento de limpeza é essencial para controle de contaminação. Três tipos de falha são consideradas: falha catastrófica, que ocorre repentinamente e leva à perda do componente, frequentemente causada por partículas grandes; falha transiente, causada por partículas que se alojam em áreas críticas entre peças, provocando alterações no comportamento e funções do componente; e falha por degradação, em que há diminuição da performance de um componente, causada por gradual desgaste e contaminação, podendo haver falha catastrófica se contaminantes adicionais forem produzidos.

Tessmann & Hong (2000) definem que falhas de movimento de peças por causa de partículas são referidas como **travamento por contaminação**, ou *silt lock*, que impede o deslocamento de peças internas ou o escoamento de fluido. Partículas pequenas acumulam em espaços entre os carretéis deslizantes e o bloco de válvulas, em quantidade suficiente para preencher uma parte da folga e provocar fricção e travamento do carretel, como representado na figura 49. Os autores escrevem que não há evidências da presença de partículas no ato da desmontagem do componente, pois são muito pequenas para serem vistas a olho nu.

Fitch (2015) detalha que o óleo hidráulico tende a vazar da região de alta pressão para a de baixa pressão. Em altas pressões de operação, o aumento da velocidade do fluido carrega ainda mais partículas para os assentamentos de sedimentos, provocando maior fricção no carretel. A figura 50 exemplifica este processo.

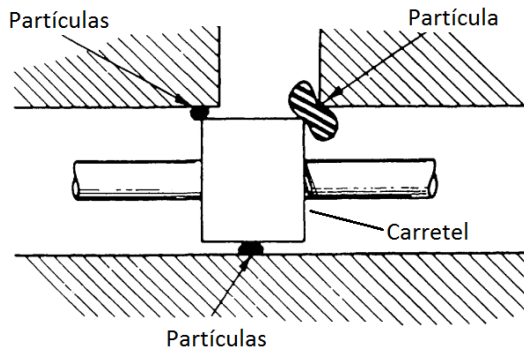


Figura 49 - Partículas em numa válvula carretel.

Fonte: Tessmann & Hong (2000).

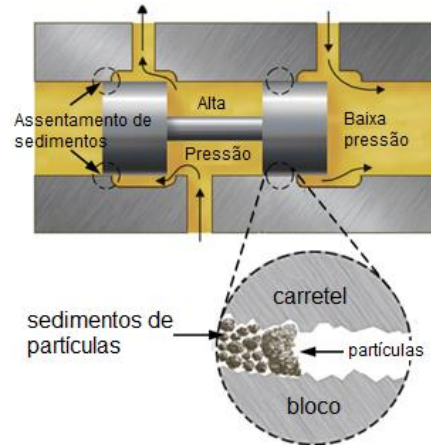


Figura 50 - Assentamento de sedimentos de partículas.

Fonte: Fitch (2015).

A escavadeira FZ-2399 utiliza válvulas de carretéis deslizantes, que controlam a passagem de óleo para os implementos, carro inferior e no circuito piloto sendo muito importante prevenir o fenômeno de travamento, a fim de se evitar custos de reparo e de máquina parada.

Tessmann & Hong (2000) citam que a degradação do desempenho do componente por partículas é normalmente chamada de **desgaste por contaminação**, acompanhada por uma mudança dimensional das superfícies de peças. Esta mudança de dimensões das superfícies acontece devido ao desgaste abrasivo, que provoca a retirada de material das peças internas, adicionando mais partículas para o óleo. Estas partículas adicionais potencializarão ainda mais o processo de desgaste abrasivo.

Tessman & Hong (2000) mencionam que “desgaste por contaminação é caracterizado por degradação do desempenho”. Os autores da citação anterior ainda ensinam que um parâmetro para quantificarmos a perda de desempenho de um sistema hidráulico é, por exemplo, a vazão de uma bomba de deslocamento fixo. As partículas contaminantes presentes no fluido irão aumentar as dimensões das folgas existentes nas bombas por abrasão, aumentando o vazamento de fluido da câmara de alta pressão para a de baixa pressão. Isto causa queda da pressão de saída da bomba, diminuindo sua vazão. Em baixas pressões de operação, a mudança de vazão seria muito pequena, porém a pressões elevadas, a diminuição da vazão da bomba seria muito grande. A figura 51 mostra desgaste abrasivo numa bomba de engrenagens.

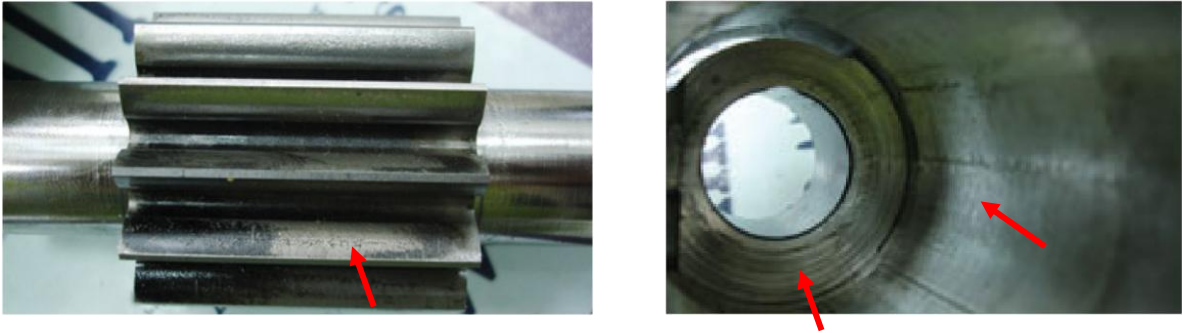


Figura 51 - Desgaste abrasivo numa bomba de engrenagens.

Fonte: Sefwat (2008).

### 2.8.1.3. Formato e tamanho de partículas

As partículas que penetram no fluido de um sistema têm formato irregular, sendo raramente redondas. Entretanto, quando engenheiros e cientistas discutem sobre contaminação particulada, o tamanho das partículas é geralmente descrito na ordem de micrometros ( $\mu\text{m}$ ) de diâmetro (TESSMANN & HONG, 2000). Tamanhos podem ser conferidos na figura 52.

O formato de uma partícula abrasiva é importante, pois além de influenciar no formato do sulco produzido no material. Partículas mais afiadas causam mais desgaste abrasivo do que partículas mais arredondadas (BLAU et al, 1992). A figura 53 mostra uma comparação entre partícula irregular e uma redonda.

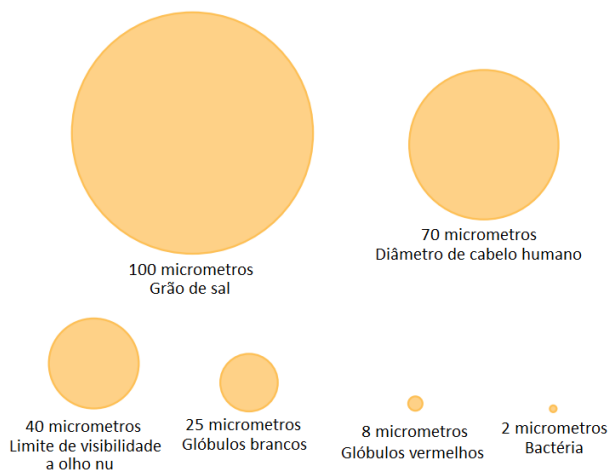


Figura 52 - Exemplo comparativo de tamanho de partículas.

Fonte: Parker (2006).

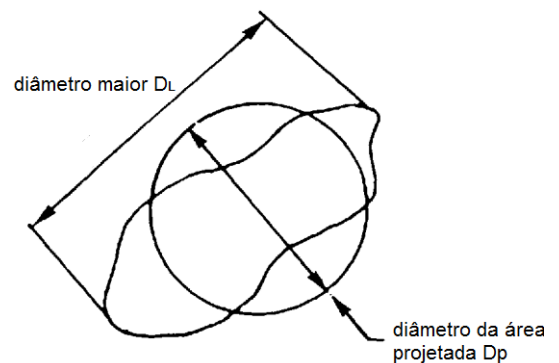


Figura 53 - Partícula irregular sendo representada por seu diâmetro projetado.

Fonte: Tessmann & Hong (2000).

#### 2.8.1.4. Nível de contaminação

O controle de contaminação pode ser realizado utilizando-se ferramentas para mensurar o nível de contaminação do óleo em determinada aplicação. Neste trabalho, os resultados de análises de óleo hidráulico da escavadeira FZ-2399 serão fornecidos segundo a norma ISO 4406:1999.

Segundo Sutherland (2008) o padrão ISO 4406:1999 é usado por diversos fabricantes e instituições técnicas como método internacionalmente aceito para quantificar as partículas presentes em uma amostra de fluido. Aparelhos contadores automáticos são empregados para analisar a distribuição de tamanhos das partículas de todos os contaminantes dentro de limites especificados.

Noria Corporation (2012) ensina a aferição do código ISO referente à limpeza do fluido, através da norma ISO 4406:1999, que determina a contagem de partículas a três níveis de tamanho: maiores que 4  $\mu\text{m}$ , maiores que 6  $\mu\text{m}$  e maiores que 14  $\mu\text{m}$ . A tabela 3 exemplifica a determinação de um código ISO.

Tabela 3 - Determinação do código ISO.

			Maiores que (part/mL)	Até ou igual a (part/mL)	Código ISO
			80000	160000	24
			40000	80000	23
			20000	40000	22
			10000	20000	21
			<b>5000</b>	<b>10000</b>	<b>20</b>
			2500	5000	19
			1300	2500	18
			<b>640</b>	<b>1300</b>	<b>17</b>
			320	640	16
			160	320	15
			80	160	14
			<b>40</b>	<b>80</b>	<b>13</b>
			20	40	12
			10	20	11
			5	10	10
			2,5	5	9
			1,3	2,5	8

	part/mL	Código ISO
>4 $\mu\text{m}$	<b>9721</b>	<b>20</b>
>6 $\mu\text{m}$	<b>1254</b>	<b>17</b>
>10 $\mu\text{m}$	326	
>14 $\mu\text{m}$	<b>73</b>	<b>13</b>
>21 $\mu\text{m}$	12	
>38 $\mu\text{m}$	5	
>70 $\mu\text{m}$	0	
>100 $\mu\text{m}$	0	

Fonte: Noria Corporation (2012).

A amostra de fluido da tabela 3, no lado esquerdo da mesma, apresentou 9721 partículas por mL (part/mL) maiores que 4  $\mu\text{m}$ , 1254 maiores que 6  $\mu\text{m}$  e 73 maiores que 14  $\mu\text{m}$ . Para aferir o código ISO, associa-se a contagem medida ao intervalo de contagem em part/mL da parte direita da tabela, escolhendo em qual intervalo o número de partículas

contadas pertence. Escolhendo o intervalo correto, determina-se o código ISO para aquela medida de partícula. Na amostra exemplificada, o código ISO é 20/17/13.

Noria Corporation (2000) cita que os laboratórios ao invés de utilizarem 1 mL de amostra, utilizam 100 mL no instrumento de medição. O número de partículas contadas é baseado neste volume. O código ISO é o expoente de uma potência de 2. A contagem de partículas máxima de cada código por 100 mL será o resultado desta potência, conforme a tabela 4. Por exemplo, para uma contagem de 1024 partículas por 100 mL, o código ISO será 10, pois 1024 é igual à potência  $2^{10}$ .

Tabela 4 - Código ISO com base em medição de 100 mL.

100 mL	1 mL	Expoente	Maiores que (part/mL)	Até ou igual a (part/mL)	Código ISO
16777216	167772,2	24	80000	160000	24
8388608	83886,08	23	40000	80000	23
4194304	41943,04	22	20000	40000	22
2097152	20971,52	21	10000	20000	21
1048576	10485,76	20	5000	10000	20
524288	5242,88	19	2500	5000	19
262144	2621,44	18	1300	2500	18
131072	1310,72	17	640	1300	17
65536	655,36	16	320	640	16
32768	327,68	15	160	320	15
16384	163,84	14	80	160	14
8192	81,92	13	40	80	13
4096	40,96	12	20	40	12
2048	20,48	11	10	20	11
1024	10,24	10	5	10	10
512	5,12	9	2,5	5	9
256	2,56	8	1,3	2,5	8

Fonte: Noria Corporation (2000).

A figura 54 permite a comparação entre diferentes níveis de contaminação.

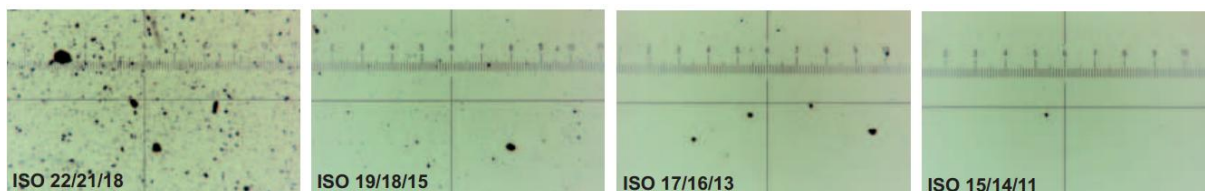


Figura 54 - Diferenças entre níveis de contaminação por inspeção visual.

Fonte: HYDAC.

### 2.8.3. Filtragem

Segundo Tessmann & Hong (2000), a filtragem é a remoção de partículas contaminantes de um fluido num sistema. Fitch (2013) cita: “uma função primária é remover e reter contaminantes conforme o óleo flui através do componente poroso chamado **meio filtrante**.”. Métodos de filtragem são utilizados para manter o sistema em determinado ou abaixo de um nível de contaminação.

Ainda segundo Tessmann & Hong (2000), o filtro ideal é aquele que dispõe de maior resistência à passagem de contaminantes enquanto oferece um mínimo de resistência ao fluxo de fluido. A maioria dos meios filtrantes é constituída de poros ou passagens capilares, compostas por um emaranhado de um material fibroso. Uma fração das partículas no fluido é retida, sendo que a retenção varia com o tamanho das mesmas, a capacidade do meio filtrante e a integridade estrutural do filtro. O processo de captura de partículas pelos meios citados é chamado de **absorção**. Dois tipos de filtros são mostrados na figura 55, onde as setas escuras são o fluido sujo e as setas claras o fluido filtrado.

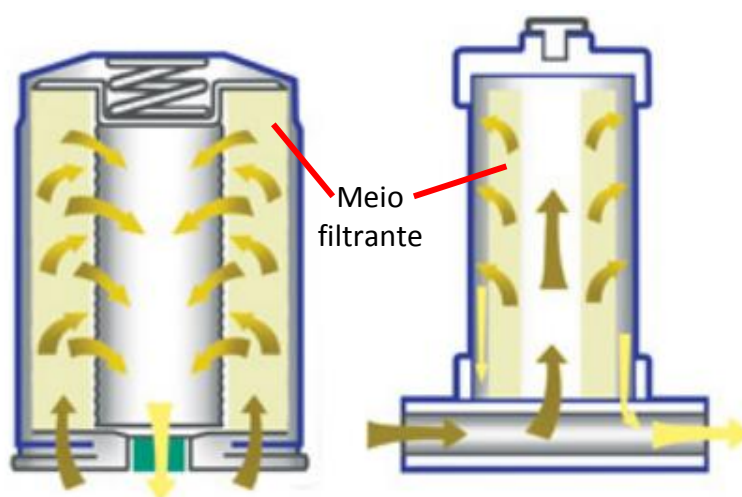


Figura 55 - Dois tipos de filtros.

Fonte: Fitch (2013).

É dito por Sutherland (2008) que a operação de um filtro necessita de uma pressão diferencial  $\Delta p$  através do meio filtrante, que é a diferença de pressão entre a entrada do filtro e a saída. A pressão na entrada do filtro é gerada pela bomba e a pressão menor na saída ocorre devido à perda de carga pela restrição do meio filtrante. Este processo é conhecido também como **queda de pressão**.

Sutherland (2008) recomenda que o tamanho principal da partícula e sua distribuição de tamanhos terão a maior influência na escolha do filtro, com intuito de se conseguir maior eficiência da filtração, eficiência energética e solução efetiva com menor custo. Quanto mais fino o filtro, ou seja, quanto menores as partículas que é capaz de reter, mais facilmente ficará obstruído por partículas grandes e mais energia necessitará para a filtração. A escolha do filtro deve levar em consideração as tolerâncias do sistema, portanto deve-se escolher o filtro mais fino necessário para a aplicação, porém capaz de remover corpos que causariam danos.

#### 2.8.3.1. Mecanismos de filtração

Sutherland (2008) afirma que “para verificar como a filtração funciona, é necessário analisar a maneira com que a rede de fibras pode reter as partículas que se movem em sua direção”. A figura 56 ilustra uma seção transversal de uma fibra com deslocamento de fluido da esquerda para a direita, havendo carregamento de partículas.

As partículas são atraídas pelas fibras do meio filtrante por meio de forças de Van der Waals, fracas, porém suficientes para prendê-las. A partícula deve ficar bem próxima à fibra, e uma vez atraída, funcionará como uma extensão da fibra capturando outras partículas. Existem três mecanismos principais de captura de partículas, a interceptação direta, impacto inercial e difusão (SUTHERLAND, 2008).

Sutherland (2008) explica que o fluido escoar em regime laminar pelas fibras do filtro, carregando as partículas consigo. Se uma linha de escoamento tiver distância em relação à fibra de menos de metade do diâmetro da partícula que carrega, a partícula fará contato com a fibra e será retida. Este mecanismo é a **interceptação direta** e acontece nos flancos da fibra, não diretamente nela.

Sutherland (2008) detalha que se uma partícula for muito grande ou se mover muito rapidamente, carregará muita inércia e não conseguirá fazer a curva da linha de escoamento. Isto fará a partícula colidir com a fibra, num mecanismo chamado de **impacto inercial**.

Um terceiro mecanismo de captura citado por Sutherland (2008) é a **difusão**, onde as partículas não acompanham as linhas de escoamento de fluido, mas as atravessam, até um momento de encontrar a fibra. Este fenômeno envolve principalmente partículas menores, como pode ser visto na figura 56. É dito e mostrado na figura 57 que mesmo muitas partículas pequenas atravessarem o meio fibroso, este pode reter partículas significativamente menores que os canais do fluxo (os poros).



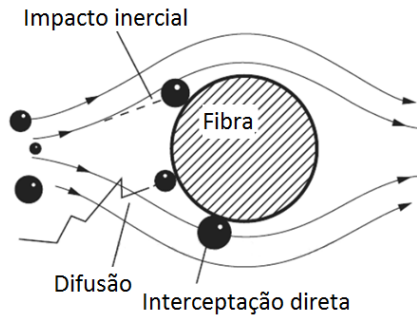


Figura 56 - Esquema de seção transversal de uma fibra capturando partículas.

Fonte: Sutherland (2008).

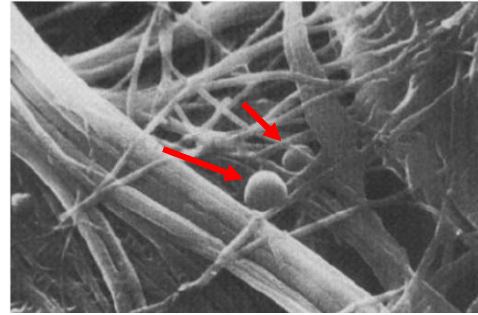


Figura 57 - Meio fibroso retendo partículas (indicadas).

Fonte: Sutherland (2008).

Dois tipos de retenção de são considerados, por **superfície** e **profundidade**.

Na retenção por superfície, como representa a figura 58, Fitch (2013) ensina que as partículas são retidas no primeiro contato com o meio filtrante, em sua superfície. Tessmann & Hong (2000) citam como exemplo deste tipo de filtragem uma peneira. Segundo Sutherland (2008), na filtragem por superfície, se o diâmetro dos poros for muito pequeno em relação ao diâmetro das partículas, elas ficarão retidas no lado da entrada do filtro, sem atravessar o meio filtrante. E se a partícula tiver diâmetro menor que o poro, ela o atravessará.

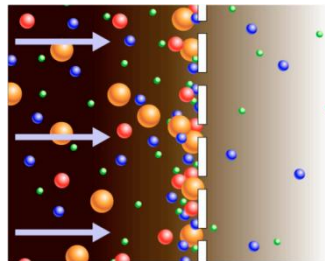


Figura 58 - Filtragem por superfície.

Fonte: Ringholm (2004).

Na retenção por profundidade, representada na figura 59, Fitch (2013) cita que os contaminantes sólidos são retidos pela superfície ou na “profundidade” do meio filtrante. Tessmann & Hong (2000) detalham que partículas grandes são retidas na superfície e partículas menores entram e são capturadas no emaranhado fibroso, dentro do meio filtrante. Sutherland (2008) complementa que os meios filtrantes possuem certa espessura, com poros variando em diâmetro ao longo do fluxo do fluido. Portanto, as partículas se movem através de um poro até encontrar um ponto onde um poro é tão pequeno que acaba retida.



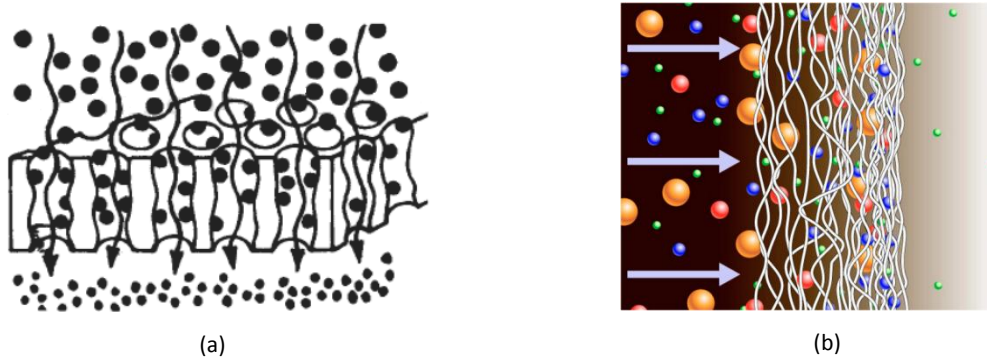


Figura 59 - Filtragem por profundidade.

Fonte: (a) Sutherland (2008), (b) Ringholm (2004).

Fitch (2013) explica que filtros de profundidade são mais eficientes em capturarem partículas menores do que os de superfície, pelo fato de oferecerem maiores chances de a partícula ser capturada, pois a mesma se move sempre colidindo com as fibras. Sendo assim, este tipo gera maior pressão diferencial em função de sua maior restrição ao fluxo de óleo. A diferença de retenção entre os dois tipos de filtragem pode ser conferida na figura 60.

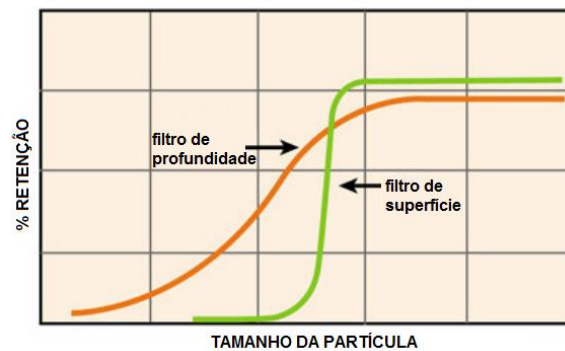


Figura 60 - Diferença de retenção entre os dois tipos de filtro.

Fonte: Fitch (2013).

### 2.8.3.2. Classificação dos filtros

Sutherland (2008) escreve que “os filtros são classificados de acordo com sua habilidade em remover partículas de um tamanho específico suspensas num fluido.”. O desempenho dos filtros pode ser determinado por vários métodos, por meio de testes que não são tratados aqui. Considera-se duas classificações.

Na classificação **absoluta**, Sutherland (2008) ensina que uma vez que o filtro não detenha todas as partículas, haverá um ponto de corte em que nenhuma partícula passará pelo meio filtrante. Este ponto de corte se refere ao diâmetro, usualmente expresso em  $\mu\text{m}$ , da

maior partícula que irá atravessar. Entretanto, este ponto não é a menor partícula retida pelo filtro, pois partículas menores podem ser atraídas pelas fibras, como mostrado na figura 52.

A **classificação beta** ( $\beta_x$ ) fornece tanto para o fabricante quanto para o usuário um método preciso e representativo de comparação entre vários meios de filtragem.  $\beta_x$  é a razão beta para partículas maiores que  $x \mu\text{m}$ ,  $N_e$  é o número de partículas por unidade de volume maiores que  $x \mu\text{m}$  que entram no filtro e  $N_s$  é o número de partículas por unidade de volume maiores que  $x \mu\text{m}$  que saem do filtro. A quantidade de partículas é contada com precisão nas duas regiões do filtro e a razão beta é calculada segundo o autor pela equação (13) (SUTHERLAND, 2008).

$$\beta_x = \frac{N_e}{N_s} \quad (13)$$

Um exemplo de interpretação do beta:  $\beta_{10} = 400$  significa que há 400 vezes mais partículas por unidade de volume na entrada do filtro do que na saída, maiores que  $10 \mu\text{m}$ . Quanto maior a razão beta, mais partículas de um determinado tamanho, ou maiores, o filtro será capaz de reter. A eficiência do filtro quanto ao tamanho de partículas é dada por (14).

$$E_x = 100 \frac{(\beta_x - 1)}{\beta_x} \% \quad (14)$$

A tabela 5 ilustra a eficiência de filtros num teste recebendo 1 milhão de partículas por unidade de volume, com beta variando de 1 a 10000, considerando o mesmo tamanho de partícula. Sutherland (2008) afirma que o tamanho de partícula correspondente ao ponto de corte e maiores,  $E_x$  deverá ser igual a 100% e para partículas menores que o ponto de corte, a eficiência será menor que 100%. Parker (2006) cita que a norma ISO 16889 requer para os meios filtrantes os valores de beta de 2, 10, 75, 100, 200 e 1000.

Tabela 5 - Eficiência de filtro e classificação beta.

Beta ( $\beta_x$ )	$E_x$ (%)	Contagem na saída
1,0	0	1000000
1,5	33	670000
2,0	50	500000
10	90	100000
20	95	50000
50	98	20000
75	98,7	13000
100	99	10000
200	99,5	5000
1000	99,9	1000
10000	99,99	100

Fonte: Sutherland (2008).

### 2.8.3.3. Filtragem pulsada

Sutherland (2008) diz que um fluxo estável de fluido pelo filtro causará uma acumulação estável de partículas no meio filtrante e aumento na queda de pressão. Um fluxo pulsante provocaria um afrouxamento das partículas menores retidas, permitindo sua passagem pelo filtro. O gráfico da figura 61 ilustra este efeito.

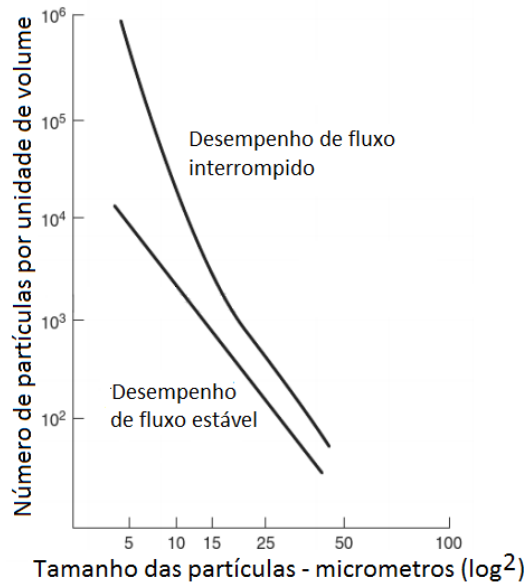


Figura 61 - Desempenho de filtragem de fluxo estável e fluxo interrompido.

Fonte: Sutherland (2008).

Segundo Tessmann & Hong (2000), “ondas de fluxo no elemento filtrante podem ter efeitos devastadores na taxa de desgaste exibido pelos componentes do sistema”. Os mesmos autores citam que estas ondas causam a liberação de contaminantes do filtro, aumentando o nível de contaminação.

### 2.8.3.4. Modos de falha de filtro

Os filtros são componentes dos sistemas hidráulicos, da mesma forma que os demais, sujeitos a falhas. Fitch (2013) enumera quatro tipos de falhas: *channeling*, quebra por fadiga, migração de meio filtrante e obstrução.

A ocorrência de *channeling* é quando em altas pressões diferenciais há o alargamento dos poros meio filtrante, diminuindo a eficiência de retenção de contaminantes. Partículas que estavam previamente capturadas pelo filtro podem ser libertadas no óleo, recontaminando o fluido do sistema. A quebra por fadiga acontece em situações de fluxo oscilante, em que o

meio filtrante sofre quebras ou rupturas, permitindo a passagem de óleo não filtrado. Migração de meio filtrante é o deslocamento de fibras deterioradas, produzindo novos contaminantes no fluido. Isto pode ser causado por fragilização do meio filtrante causada por óleo incompatível, excesso de vibração por má acomodação do filtro ou pressões diferenciais muito altas.

A operação de filtragem causa o acúmulo de partículas no filtro. O excesso de contaminantes retidos além da capacidade causa a obstrução do filtro. A obstrução pode ser prematuramente causada por excesso de impurezas no fluido.

#### 2.8.4. Contaminação e filtragem na FZ-2399

Segundo a U&M, a entrada de contaminantes externos no sistema hidráulico da escavadeira na operação pode ocorrer por meio de passagem de partículas pelas vedações dos cilindros hidráulicos e pelo filtro de respiro do tanque hidráulico. Vedações de cilindros danificadas provocam vazamento de óleo, evidenciado na figura 62, e conseqüentemente entrada de contaminação. Filtro do respiro do tanque, mostrado na figura 63, com excesso de impurezas pode sofrer falhas de *chanelling*, quebras por fadiga e migração de meio filtrante. Ainda segundo a empresa, estocagem incorreta de componentes hidráulicos, limpeza mal feita de peças na montagem e mistura de óleo hidráulico novo com um pouco de óleo restante no sistema no ato da troca são outros fatores causadores de contaminação.



Figura 62 - Vazamento em cilindro.

Fonte: U&M (2015).



Figura 63 - Filtro do respiro do tanque hidráulico.

Fonte: U&M (2015).

A contaminação interna, de acordo com profissionais da U&M, como limalhas e partículas metálicas, são causadas por desgaste abrasivo em componentes com movimento relativo, como bombas, atuadores e válvulas. Partículas sólidas no sistema provocam ainda mais desgaste, podendo causar obstrução dos meios filtrantes se uma ação corretiva não for

tomada, se não houver devida atenção aos níveis de contaminação e se o controle de contaminação for precário.

A FZ-2399 da U&M utiliza filtros de diferentes classificações absolutas em cada parte do sistema hidráulico. Dois **filtros de sucção**, aplicados na sucção das bombas principais e bomba piloto, têm classificação absoluta com ponto de corte de 177  $\mu\text{m}$ . O **filtro piloto**, de 10  $\mu\text{m}$ , é aplicado no circuito de pilotagem na saída da bomba piloto. Os drenos externos utilizados nas bombas e motores de pistão são ligados ao **filtro de dreno**, de 10  $\mu\text{m}$ . Três **filtros de alta pressão**, de 95  $\mu\text{m}$ , são utilizados nas saídas dos blocos de válvulas, dois no bloco de controle principal e um no bloco de controle de giro. Dois **filtros de retorno** de 10  $\mu\text{m}$  são aplicados no tanque na linha de retorno dos atuadores. O sistema de diálise *online* utiliza um filtro absoluto de 2  $\mu\text{m}$ .

## 2.9. MANUTENÇÃO

A escavadeira hidráulica é um tipo de máquina de grande complexidade, que atrela vários tipos de sistemas. O mau funcionamento de um sistema irá impactar negativamente na operação da máquina como um todo, por isso, a manutenção da máquina deve ser feita de maneira integral, para garantir que o equipamento ofereça o máximo de produtividade com menores índices de anomalias, falhas e conseqüentemente, custos.

Este trabalho considera a manutenção aplicada somente no sistema hidráulico da escavadeira FZ-2399. Antes de abordar o assunto aplicado à escavadeira, é escrito sobre os tipos de manutenção e aplicação no equipamento.

A manutenção relacionada à metodologia adotada neste trabalho é a preditiva, portanto esta modalidade receberá maior enfoque.

### 2.9.1. Tipos de manutenção

Os tipos de manutenção que são discutidos no trabalho são três: corretiva, preditiva e preventiva.

#### 2.9.1.1. Manutenção corretiva

Segundo Kardec & Nascif (2001), a manutenção corretiva é a ação para correção de falha ou de desempenho abaixo do esperado. Sendo uma atuação para correção de defeito ou

restaurar o desempenho original, dividida em duas classes: corretiva não planejada e corretiva planejada.

A corretiva não planejada acontece de maneira aleatória, em decorrência de uma falha, na qual não há tempo para preparação do serviço de reparo. Ela implica em altos custos, pois a falha inesperada pode acarretar em perdas de produção, perda de qualidade, altos custos de manutenção, riscos à segurança e possível extensão do dano pelo equipamento.

A corretiva planejada ocorre em decorrência de desempenho abaixo do esperado, ou há uma decisão gerencial conhecida para a correção da falha, sendo que algum planejamento pode ser feito quando a falha ocorrer. Esta manutenção implica em custos e riscos à segurança menores, pois estimula maior planejamento dos serviços, garantia de sobressalentes e ferramental e existência de recursos humanos para a execução dos serviços.

#### 2.9.1.2. Manutenção Preditiva

De acordo com Kardec & Nascif (2001) manutenção preditiva tem por objetivo prevenir falhas por meio de acompanhamento de diversos parâmetros, permitindo a operação contínua dos equipamentos pelo maior tempo possível. Esta manutenção privilegia a disponibilidade à medida que não se promove intervenções nos equipamentos ou sistemas, pois as medições e verificações são feitas com o ativo produzindo.

Quando determinado componente do equipamento atinge fim da vida útil, uma decisão de intervenção é tomada para a substituição, sendo esta a manutenção corretiva planejada.

A manutenção preditiva é indicada quando o equipamento permitir monitoramento; o equipamento merecer este tipo de atenção, em função dos custos envolvidos; as falhas devem ser provenientes de causas que possam ser monitoradas e ter seu progresso acompanhado; ser estabelecido um programa de monitoramento e diagnóstico; redução de custos por evitar intervenções desnecessárias e manter os equipamentos operando de maneira segura por mais tempo.

Segundo os autores, a ocorrência de falhas catastróficas nos equipamentos é bastante reduzida, reduzindo as paradas inesperadas que implicariam em prejuízos. A manutenção preditiva é a que menos interfere nos equipamentos.

Os custos da manutenção preditiva devem ser analisados de diferentes ângulos. Primeiros, o acompanhamento periódico não é muito caro se forem envolvidos aparelhos avançados em microeletrônica e a mão-de-obra não apresenta custos significativos. Por outro

lado, o custo inicial de implantação de sistemas de monitoramento contínuo é relativamente elevado.

É de fundamental importância que a mão-de-obra responsável pelo monitoramento e análise seja bem treinada. É preciso medir, interpretar resultados e formular diagnósticos. A manutenção preditiva é bem feita se forem feitas ações de intervenção com a qualidade dos dados registrados.

### 2.9.1.3. Manutenção preventiva

Kardec & Nascif (2001) ensinam que o objetivo da manutenção preventiva é prevenir a ocorrência de falhas ou queda e desempenho. Os fabricantes nem sempre disponibilizam dados precisos para planos de manutenção preventiva, as condições ambientais e operacionais influenciam muito no modo de degradação dos componentes, por isso a definição da periodicidade deve ser estipulada para cada equipamento, cada um operando em condições similares.

A manutenção preventiva é mais conveniente quando a substituição de componente for simples, maiores forem os custos das falhas, maior a influência das falhas na produção, quando a preditiva não é possível, quando o fator segurança é mandatório, quando utiliza-se equipamentos críticos de difícil liberação, quando há riscos de agressão ao meio ambiente e para sistemas complexos de operação contínua.

### 2.9.2. Manutenção na FZ-2399

A escavadeira da U&M recebe os três tipos de manutenção tratados neste capítulo. Segundo trabalhadores da empresa, as preventivas são feitas conforme plano elaborado com base em recomendações do fabricante e experiência de operação desenvolvida ao longo do tempo.

Manutenções corretivas não planejadas esporadicamente são feitas quando alguma falha inesperada ocorre no equipamento.

A manutenção preditiva da escavadeira é realizada por meio de inspeções dos próprios operadores e por meio de análise laboratorial de fluidos. Os fluidos analisados são: óleo do motor, óleo do sistema hidráulico, óleo do PTO, líquido de arrefecimento do motor e óleo dos comandos finais. Este trabalho trata apenas do fluido do sistema hidráulico.

O plano de manutenção preventiva do feito pelo fabricante A do sistema hidráulico é conferido na tabela 6.

Tabela 6 - Atividades de manutenção do sistema hidráulico.

Peças	10 h	50 h	250 h	500 h	1000 h	2000 h	2500 h	4000 h	12000 h
Verificar nível óleo hidráulico	X								
Drenar umidade do tanque			X						
Trocar óleo hidráulico						X			
Limpar filtro de sucção						X			
Trocar filtros de retorno					X				
Trocar filtro de dreno				X					
Trocar filtro piloto					X				
Verificar mangueiras e linhas (vazamento e aperto)	X								
Verificar mangueiras e linhas (trincadas, torcidas, etc.)			X						
Trocar filtro de alta pressão									X
Limpar respiro do tanque				X					

Fonte: Fabricante A.

Quanto à troca de óleo hidráulico, o fabricante A recomenda o intervalo de 2000 h para o óleo utilizado na FZ-2399, o P MHSE, citado na seção 2.3. Entretanto, a U&M passou a trocar o óleo por condição ao invés de seguir o intervalo de 2000 h do plano.

O plano de manutenção preventiva do sistema hidráulico feito pela U&M é conferido na tabela 7. As atividades de 10 h são realizadas pelos operadores diariamente.

Tabela 7 - Plano de manutenção feito pela U&M.

Atividades	125 h	250 h	500 h	1000 h	2000 h	6000 h
Coletar amostra óleo hidráulico			X			
Limpar respiro tanque hidráulico			X			
Drenar umidade do tanque				X		
Substituir filtro de alta pressão						X
Substituir filtro piloto			X			
Substituir filtro de dreno			X			
Substituir filtro de retorno			X			
Substituir óleo hidráulico					X	
Verificar cilindros (vazamento, fugas, folgas)		X				

Fonte: U&M (2015).



### 3. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO DE DIÁLISE *ONLINE*

O projeto feito pela U&M de implantação do aparelho de filtragem auxiliar, ou diálise *online*, no tanque de fluido hidráulico da escavadeira FZ-2399 4020 foi feito da seguinte maneira: uma mangueira de sucção foi instalada com um terminal ligado abaixo do tanque e o outro conectado na entrada da bomba do aparelho. Outra mangueira, conectada na saída do aparelho, retorna óleo filtrado ao tanque pela parte superior. O termo *online* se refere ao fato de o sistema atuar integrado à escavadeira operando, com o óleo hidráulico em circulação.

A escolha do aparelho para cumprir a tarefa de filtragem do fluido hidráulico levou em conta suas especificações, capacidade informada pelo fabricante e as características técnicas da escavadeira para recebê-lo.

Este capítulo aborda as especificações do aparelho de diálise *online*, a descrição sobre a instalação na escavadeira FZ-2399 4020, o desenho do circuito hidráulico representativo da associação da diálise com o tanque hidráulico, o processo de coleta de amostra de fluido pela U&M e a análise de óleo feita pela Empresa S.

#### 3.1. ESPECIFICAÇÕES E ESCOLHA DO APARELHO

O aparelho de filtragem auxiliar utilizado, modelo FOL-15-M-24-DM2-PF, mostrado na figura 64, foi adquirido pronto, fabricado pela Empresa H. O filtro faz parte do conjunto e também é feito pela mesma empresa. Segundo o fabricante, este dispositivo de filtragem possui aplicação universal para filtragem de óleo, pode ser utilizado em diversas aplicações e não apenas na escavadeira hidráulica.

As motivações para a escolha do modelo aplicado na escavadeira foram: a tensão de alimentação do sistema elétrico da máquina, a vazão de operação, o ponto de corte do filtro e o volume de óleo do tanque a ser filtrado. As especificações técnicas do aparelho estão presentes na tabela 8.

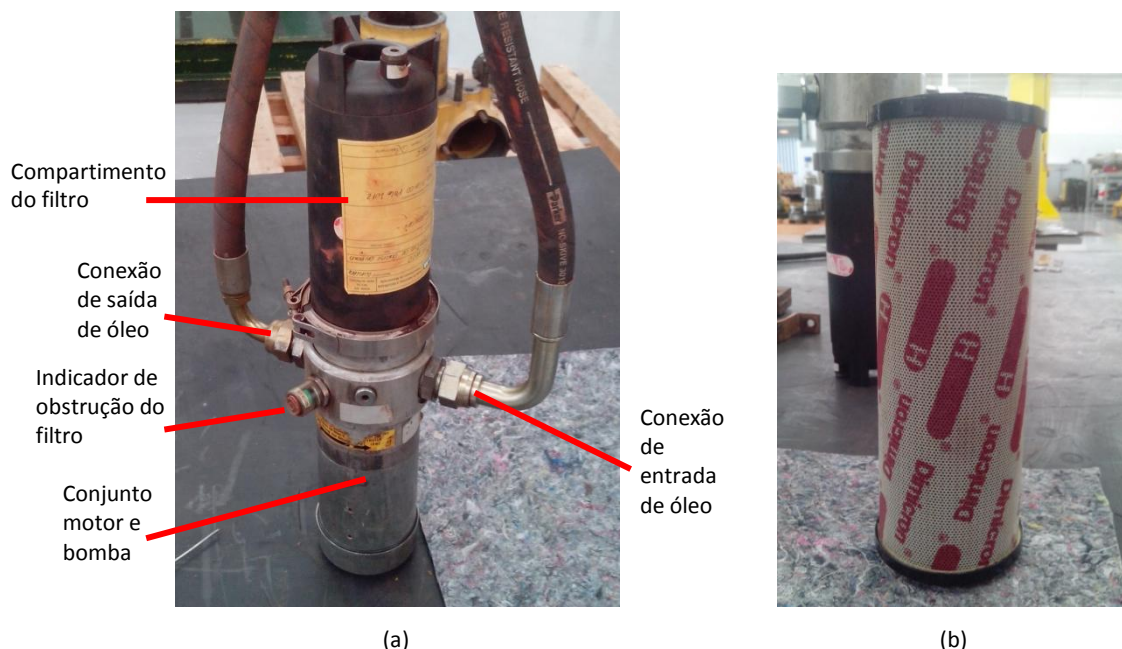


Figura 64 - Aparelho de filtragem auxiliar FOL-15-M-24-DM2-PF (a) e o filtro (b).

Fonte: U&M (2015).

Tabela 8 - Especificações do aparelho de diálise.

<b>Filtro</b>	Elemento filtrante Razão beta Capacidade de retenção de contaminante	DIMICRON 2 $\mu$ m absoluto $\beta_2 > 5000$ 200g a $\Delta p = 2,5$ bar (0,25 MPa)
<b>Bomba</b>	Tipo Vazão máxima Pressão máxima de operação Temperatura ambiente	Bomba de palhetas 15 L/min 4,5 bar (0,45 MPa) -20 a 40 °C
<b>Fluido</b>	Intervalo de viscosidade Intervalo de temperatura permitido	15 a 1000 cSt (mm <sup>2</sup> /s) 0 a 80 °C
<b>Motor</b>	Tensão de alimentação Potência	24 V DC 200 W
<b>Outros dados</b>	Peso Conexões hidráulicas	11 kg 1" ISO 228

Fonte: Tabela do fabricante<sup>8</sup>.

O filtro utilizado pela diálise *online*, modelo Dimicron 2, possui ponto de corte igual a 2  $\mu$ m absoluto, menor do que os originais utilizados no sistema hidráulico da escavadeira. Partículas que não forem retidas pelos filtros da máquina têm maior chance de serem retidas no filtro do sistema auxiliar devido ao fato de os poros serem menores. O fator beta maior que 5000 para 2  $\mu$ m garante eficiência maior que 99,90 % para o filtro. A vazão de 15 L/min é a opção indicada para sistemas com volume de óleo de 800 a 2000 L e viscosidade de 15 a 1000 cSt, sendo que a escavadeira comporta 1350 L de óleo. As temperaturas no local de operação

<sup>8</sup> Disponível em: <[http://www.hydac.com.au/MessageForceWebsite/Sites/279/Files/offline\\_filter\\_olf5.pdf](http://www.hydac.com.au/MessageForceWebsite/Sites/279/Files/offline_filter_olf5.pdf)>. Acesso em: 9 dez. 2015.

da FZ-2399 4020 geralmente ficam entre 20 e 40 °C. O fluido hidráulico na escavadeira opera a aproximadamente 50 °C, ficando com viscosidade entre 15 e 46 cSt. A tensão de alimentação de 24 V em corrente contínua do aparelho é a mesma utilizada pelo sistema elétrico da máquina, permitindo uma ligação compatível.

### 3.2. MONTAGEM NA FZ-2399 4020

A escavadeira da U&M no local da operação é mostrada na figura 65. O sistema de diálise *online* é fixado nas chapas metálicas que protegem o tanque hidráulico na parte traseira. O dispositivo é instalado em lugar de fácil acesso, próximo a passarelas e outros sistemas que recebem inspeção periódica.

A sucção de óleo do tanque é feita pela bomba do aparelho de diálise. O óleo sai do tanque pela conexão e mangueira de sucção, indicada na figura 66, sendo impulsionado pela bomba para o filtro. Após passar pelo filtro, o fluido segue pela mangueira de retorno sendo conduzido filtrado de volta ao tanque hidráulico, como mostra a figura 67.



Figura 65 - FZ-2399 4020 em operação. Vemos a localização do tanque hidráulico e do aparelho de diálise.

Fonte: U&M (2015).

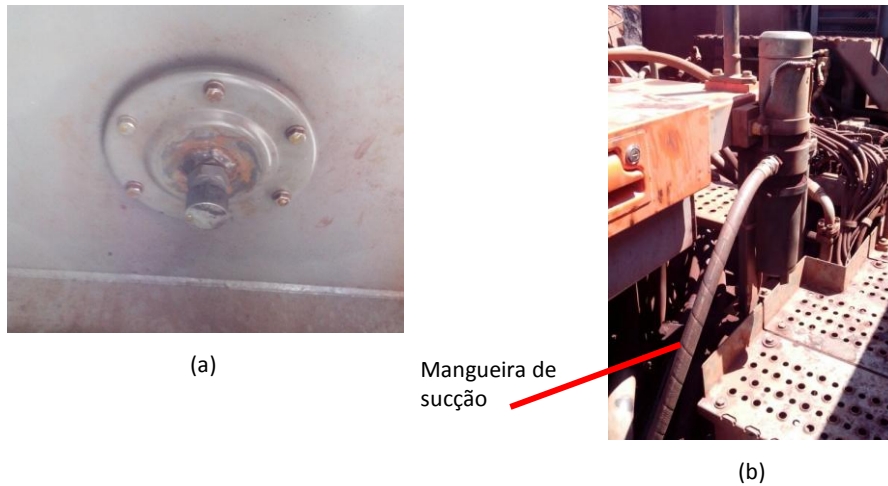


Figura 66 - Conexão de sucção de óleo (a) na parte inferior do tanque e aparelho de diálise (b) instalado.

Fonte: U&M (2015).

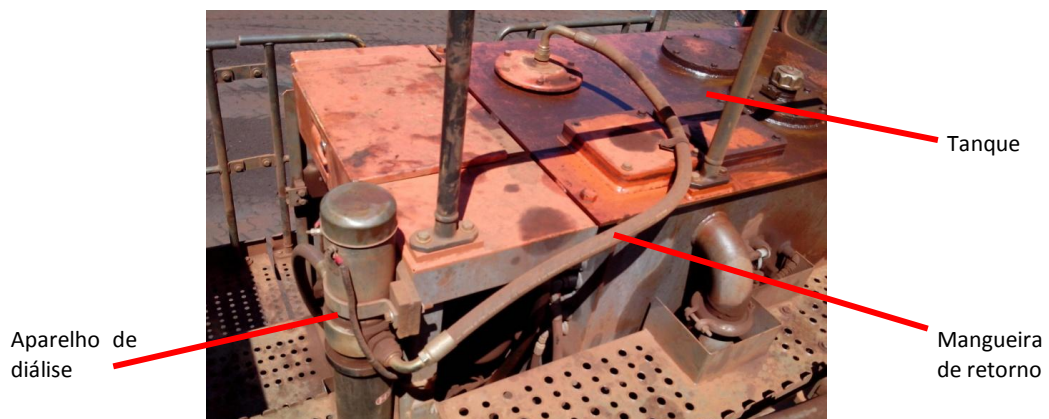


Figura 67 - Retorno de óleo ao tanque.

U&M (2015).

### 3.3. CIRCUITO HIDRÁULICO

O sistema de diálise *online* em conjunto com o tanque hidráulico da escavadeira pode ser representado por meio da simbologia utilizada para sistemas hidráulicos. O circuito apresentado na figura 68 foi desenhado com o auxílio do *software* Automation Studio 5.0.

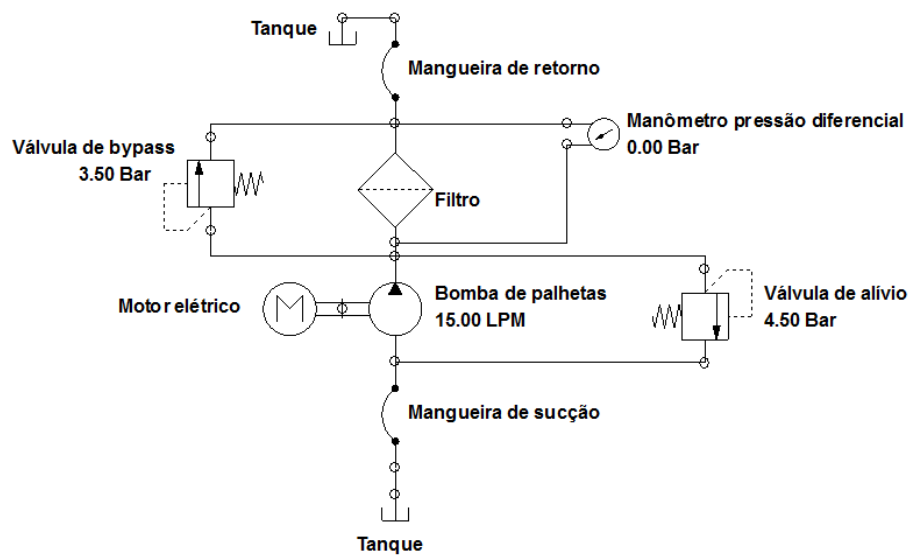


Figura 68 - Circuito hidráulico do sistema de diálise online.

O circuito da figura 68 proporciona uma visão completa do sistema de diálise. Nele observa-se uma válvula de alívio associada paralelamente à bomba. Esta válvula limita a pressão na saída da bomba em 4,5 bar (0,45 MPa) para evitar danos a esta. O filtro também recebe uma válvula de segurança, a válvula de *bypass*, que se abre quando a pressão de entrada atinge 3,5 bar (0,35 MPa), evitando rompimento do meio filtrante e migração de fragmentos para o tanque. A figura 69 representa uma simulação de funcionamento do sistema.

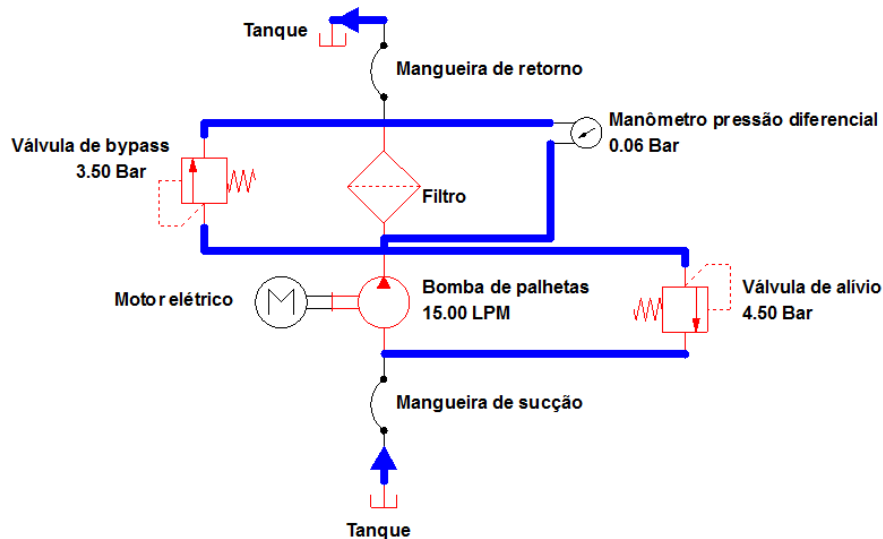


Figura 69 - Simulação do sistema de diálise online. As linhas em azul são as alimentadas pelo fluido.

Observa-se na simulação o regime de funcionamento normal do sistema, em que não há obstrução do filtro e que as válvulas de alívio e *bypass* permanecem fechadas. O *software*

foi eficaz em permitir visualizar os componentes do sistema e a trajetória do óleo, porém é limitado em não ter ajustes de parâmetros como viscosidade do fluido, nível de contaminação e classificação do filtro como eficiência e beta. Portanto, não foi possível determinar a real pressão diferencial, somado ao fato de que não foi monitorada na operação.

Este capítulo apresentou o projeto do sistema de diálise *online* utilizando um aparelho de filtragem de óleo disponível comercialmente. A escolha do modelo mostrado levou em conta especificações teóricas disponibilizadas pelo fabricante. A eficácia da filtragem auxiliar associada à escavadeira hidráulica com respeito ao nível de contaminação é estudada e discutida no capítulo 4.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na verificação do nível de contaminação do óleo hidráulico da escavadeira FZ-2399 4020 são considerados como parâmetros o código ISO, contagem de partículas e verificação qualitativa dos contaminantes.

Uma inspeção visual do filtro utilizado na diálise é feita para verificar o estado do mesmo. Como a sucção da bomba é na parte inferior do tanque da máquina, local onde há assentamento de impurezas, é esperado que impurezas visíveis sejam encontradas. O estado do filtro quanto a danos e deformações em decorrência do trabalho com fluido quente é checado. Verifica-se também a limpeza interna do compartimento do filtro, à procura de sujidade visível.

### 4.1. RESULTADOS DA ANÁLISE DE ÓLEO

Os resultados das análises de óleo hidráulico da escavadeira 4020, quanto ao código ISO, podem ser conferidos na tabela 9. São feitas comparações entre resultados de análises feitas antes da instalação da diálise e após a instalação. É feito o monitoramento do nível de contaminação do óleo hidráulico num período de dez meses utilizando a filtragem adicional, começando na primeira coleta de amostra em 15 de dezembro de 2014 e terminando na última coleta em 28 de setembro de 2015.

O período anterior ao da instalação da diálise avaliado foi de quase seis meses, de 2 de maio de 2014 a 25 de novembro de 2014, lembrando que a máquina começou a operar com o sistema instalado em 1 de dezembro de 2014. Foi selecionado este período de tempo para o monitoramento ser feito com o mesmo óleo hidráulico, que foi trocado na manutenção preventiva de 2 de maio de 2014 e permaneceu na escavadeira até a troca seguinte, em 25 de novembro. Na preventiva de 25 de novembro, foi instalada a diálise e trocado o óleo, que permaneceu na máquina até a última coleta antes do fechamento deste monitoramento, em 28 de setembro de 2015. Os dois períodos são distinguidos na tabela 9 por uma linha vermelha.

Tabela 9 - Comparação de códigos ISO antes e depois da instalação da diálise.

Data da coleta	Horas da máquina	Horas do óleo	Óleo trocado	Troca de filtro	Código de avaliação	ISO4	ISO6	ISO14	Código ISO
28/09/2015	22444	5066	Não	Sim	NOR	20	17	13	20/17/13
30/08/2015	21913	4535	Não	Sim	NOR	21	18	13	21/18/13
05/08/2015	21436	4058	Não	Sim	NOR	22	19	14	22/19/14
09/07/2015	20971	3593	Não	Sim	NOR	19	16	13	19/16/13
11/06/2015	20457	3079	Não	Sim	NOR	19	16	12	19/16/12
14/05/2015	19942	2564	Não	Não	NOR	20	18	16	20/18/16
17/04/2015	19446	2068	Não	Sim	NOR	23	21	13	23/21/13
10/03/2015	18878	1500	Não	Não	NOR	20	16	12	20/16/12
15/12/2014	18382	267	Não	Não	NOR	19	17	14	19/17/14
25/11/2014	18115	4324	Sim	Sim	MON				IMPUREZAS
08/11/2014	17859	4068	Não	Não	NOR	19	16	12	19/16/12
16/10/2014	17628	3837	Não	Sim	MON				IMPUREZAS
27/09/2014	17358	3567	Não	Não	NOR	20	17	12	20/17/12
13/09/2014	17098	3307	Não	Sim	MON				IMPUREZAS
08/08/2014	16580	2789	Não	Sim	NOR	21	18	13	21/18/13
17/07/2014	16304	2513	Não	Não	MON				IMPUREZAS
30/06/2014	16037	2246	Não	Sim	NOR	21	16	11	21/16/11
11/06/2014	15791	2000	Não	Não	NOR	22	19	13	22/19/13
02/05/2014	15530		Sim	Não	MON	22	18	12	22/18/12

Legenda: NOR – normal , MON – monitorar

Na análise de nível de contaminação através de código ISO, nota-se que não houve mudanças significativas nos códigos ISO 4, 6 e 14 comparando os dois períodos. É importante lembrar que a Empresa S considera como mais relevantes ISO 6 e ISO 14, pois consideram partículas de maior diâmetro.

Antes da utilização da diálise, houve resultados indicando a presença de impurezas nas amostras, com *status* em *monitorar*. A Empresa S alega que as impurezas podem ter origem em erros nos procedimentos de coleta, normalmente causados por contaminação acidental da mangueira ou do recipiente, fazendo com que a amostra não representasse mais o estado de contaminação do óleo contido na máquina. As impurezas são visíveis na parte interna da tampa do frasco. Com isso, o técnico responsável não contou as partículas para não danificar o equipamento de contagem automática. Os códigos ISO 14 ficaram todos abaixo de 15, recomendado pela Empresa S para sistemas hidráulicos. O ISO 6, apenas na coleta de 11 de junho de 2014, ficou em 19, acima do valor 18 recomendado, porém acompanhado de 13 na ISO 14.

Avaliando o período com utilização do sistema de diálise, podemos observar que o código ISO 14 esteve abaixo de 15 em todas as amostras, exceto a coletada em 14 de maio,



que registrou 16. Na ISO 6, tivemos valor 21 em 17 de abril e 19 em 5 de agosto. Não houve resultados constando impurezas. A grande maioria dos códigos ISO permaneceu abaixo do limite recomendado de 18/15. O nível de contaminação no sistema hidráulico permaneceu constante e abaixo do limite recomendado após a instalação da filtragem adicional, ficando com classificação *normal*.

Um resumo dos resultados por meio de código ISO pode ser conferido no gráfico da figura 70.

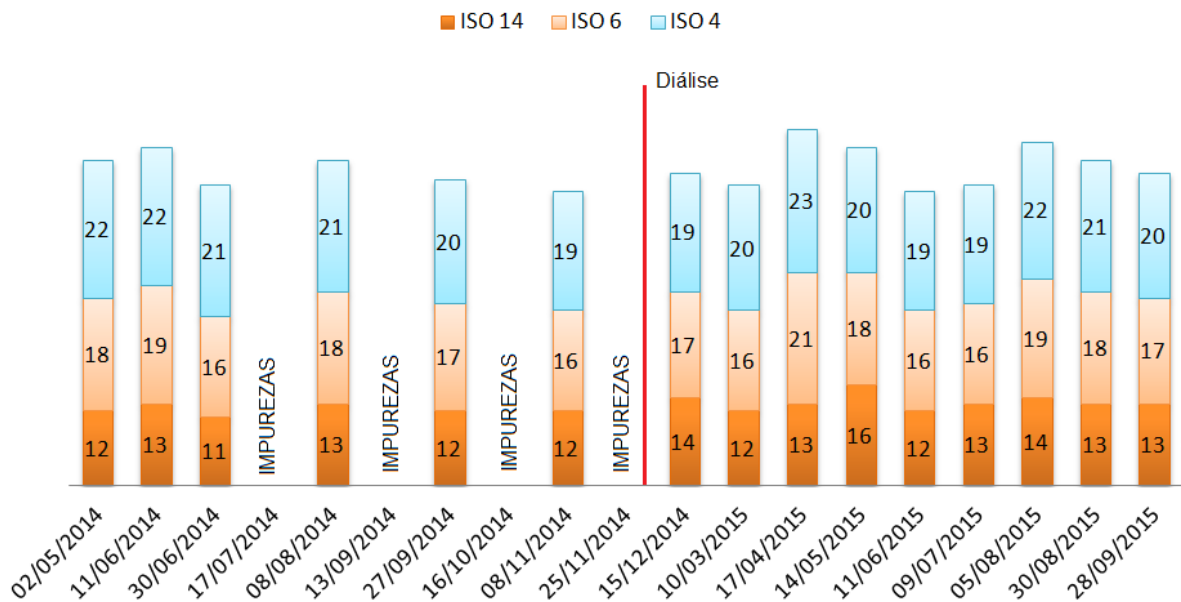


Figura 70 - Gráfico comparativo de código ISO.

A tabela 10 apresenta resultados quantitativos da contagem das partículas das amostras por 1 mL, obtidos por meio do contador automático de partículas da Empresa S (APC). Nela também há também a comparação entre os dois períodos de monitoramento como na tabela 9.

Tabela 10 - Comparação de contagem de partículas antes e depois da instalação da diálise.

Data da coleta	Horas da máquina	Horas do óleo	Óleo trocado	Troca de filtro	Código de avaliação	4 µm	6 µm	10 µm	14 µm	18 µm	21 µm	38 µm	50 µm
28/09/2015	22444	5066	Não	Sim	NOR	8221	739	178	73	44	31	7	5
30/08/2015	21913	4535	Não	Sim	NOR	11314	1595	317	80	33	21	5	3
05/08/2015	21436	4058	Não	Sim	NOR	21241	3184	536	156	71	41	2	1
09/07/2015	20971	3593	Não	Sim	NOR	4231	481	142	75	42	32	18	14
11/06/2015	20457	3079	Não	Sim	NOR	4361	429	84	33	16	10	2	1
14/05/2015	19942	2564	Não	Não	NOR	5887	1323	642	473	392	347	201	176
17/04/2015	19446	2068	Não	Sim	NOR	77482	15669	241	51	19	10	0	0
10/03/2015	18878	1500	Não	Não	NOR	6139	537	89	35	18	12	2	1
15/12/2014	18382	267	Não	Não	NOR	3553	1002	333	145	82	62	19	8
25/11/2014	18115	4324	Sim	Sim	MON	1	1	1	1	1	1	1	1
08/11/2014	17859	4068	Não	Não	NOR	4533	458	107	39	20	16	10	7
16/10/2014	17628	3837	Não	Sim	MON	1	1	1	1	1	1	1	1
27/09/2014	17358	3567	Não	Não	NOR	5443	747	114	26	15	12	8	7
13/09/2014	17098	3307	Não	Sim	MON	1	1	1	1	1	1	1	1
08/08/2014	16580	2789	Não	Sim	NOR	11222	2337	319	63	28	20	6	3
17/07/2014	16304	2513	Não	Não	MON	1	1	1	1	1	1	1	1
30/06/2014	16037	2246	Não	Sim	NOR	14547	443	37	13	7	5	1	1
11/06/2014	15791	2000	Não	Não	NOR	33852	2768	240	44	14	9	3	2
02/05/2014	15530		Sim	Não	MON	25082	1377	108	31	11	6	0	0

Legenda: NOR – normal , MON – monitorar

Ao analisar a tabela 10, é possível notar que a contagem de partículas durante o funcionamento da filtragem auxiliar não sofreu queda substancial para partículas maiores que 4 µm, desconsiderando as análises que constaram impurezas, representadas pelo número 1, com *status* em *monitorar* do período anterior.

Para partículas maiores que 6 µm, também não houve queda expressiva na contagem. Houve análises com mais de 15000 e 3000 partículas por 1 mL, enquanto que antes da diálise a maior contagem foi 2768.

Para 14 µm, ocorre situação diferente, com contagens de partículas pouco maiores durante o funcionamento da diálise *online*.

Verificando tamanhos de partículas de 18 até 50 µm, percebemos que a contagem se torna notavelmente maior com a filtragem auxiliar.

A figura 71 mostra três gráficos comparativos a respeito da contagem de partículas.

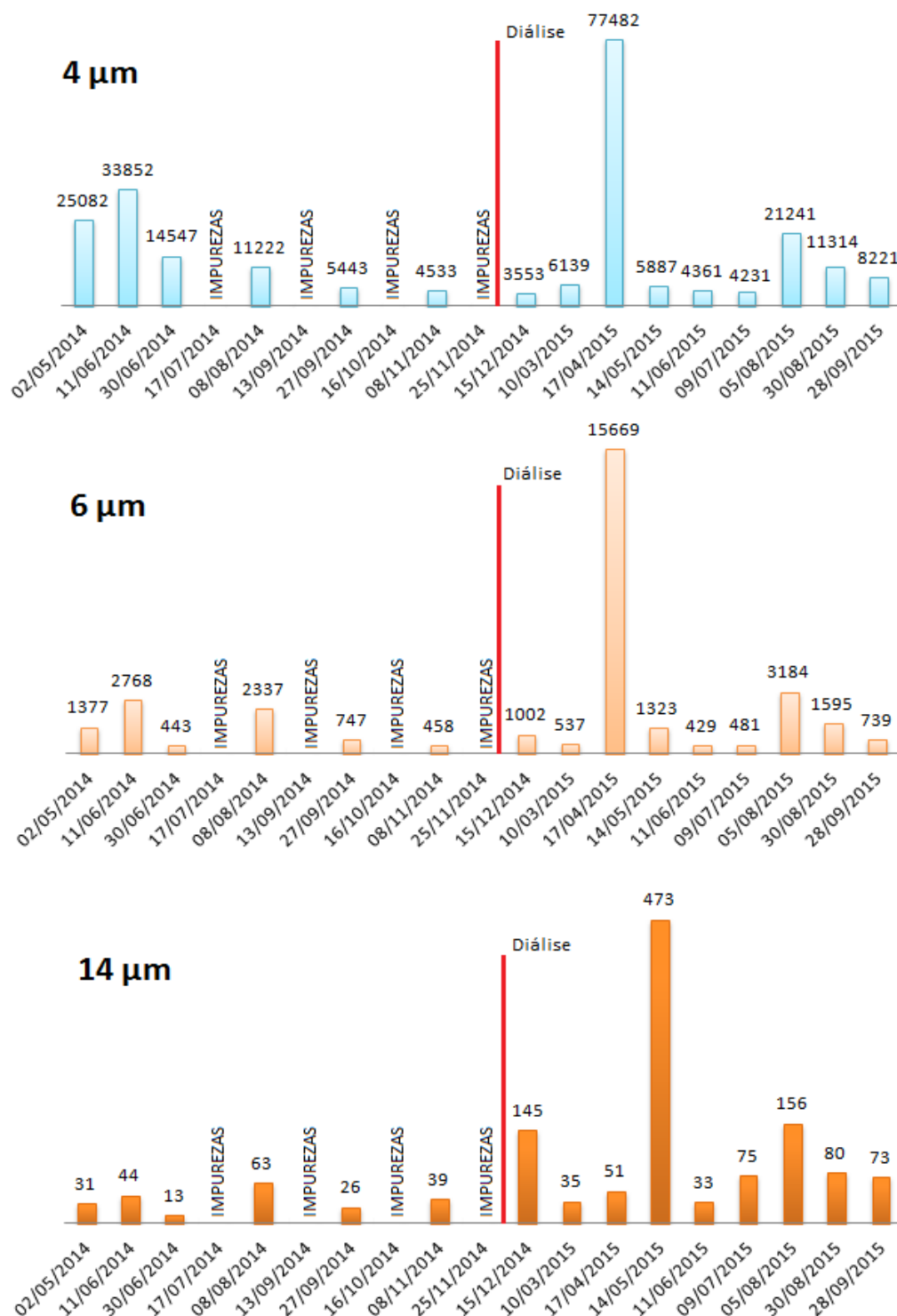


Figura 71 - Comparativo entre contagem de partículas para 4, 6 e 14 μm.

A diferença entre os dois períodos é mais visível com o auxílio dos gráficos de barras da figura 71. Verifica-se que em 14 μm, as barras dos gráficos tendem a ficarem maiores no período de funcionamento da filtragem auxiliar. Para 6 μm, as barras dos gráficos possuem tamanhos semelhantes, desconsiderando o dia 17/04/2015, em ambos os períodos. No tamanho 4 μm, desconsiderando também 17/04/2015, as barras do período anterior

apresentam valores maiores. Por meio destas evidências, a contagem de partículas maiores aumentou com a utilização da diálise, considerando o trabalho da escavadeira sempre nas mesmas condições. As discrepâncias nas datas de 17/04 para 4 e 6 µm e 14/05 para 14 µm podem acontecer por erro de coleta, como não coletar amostra com o óleo em circulação.

Por fim, os teores dos elementos químicos encontrados na amostra pelo plasma indutivamente acoplado (ICP) são revelados. A tabela 11 exhibe estes resultados.

Tabela 11 - Teores em ppm de elementos químicos relevantes ao estudo.

Data da coleta	Horas da máquina	Horas do óleo	Óleo trocado	Troca de filtro	Código de avaliação	Cr	Cu	Fe	Pb	Si
28/09/2015	22444	5066	Não	Sim	NOR	4	1	24	1	0
30/08/2015	21913	4535	Não	Sim	NOR	1	3	19	0	0
05/08/2015	21436	4058	Não	Sim	NOR	1	5	17	0	0
09/07/2015	20971	3593	Não	Sim	NOR	2	5	16	0	0
11/06/2015	20457	3079	Não	Sim	NOR	0	6	15	0	0
14/05/2015	19942	2564	Não	Não	NOR	1	7	13	0	1
17/04/2015	19446	2068	Não	Sim	NOR	2	10	15	0	5
10/03/2015	18878	1500	Não	Não	NOR	1	8	10	0	1
15/12/2014	18382	267	Não	Não	NOR	0	6	6	0	0
25/11/2014	18115	4324	Sim	Sim	MON	1	6	7	0	1
08/11/2014	17859	4068	Não	Não	NOR	0	7	11	1	1
16/10/2014	17628	3837	Não	Sim	MON	0	12	12	0	2
27/09/2014	17358	3567	Não	Não	NOR	0	8	4	0	0
13/09/2014	17098	3307	Não	Sim	MON	1	14	12	1	2
08/08/2014	16580	2789	Não	Sim	NOR	1	12	8	2	1
17/07/2014	16304	2513	Não	Não	MON	1	15	8	2	3
30/06/2014	16037	2246	Não	Sim	NOR	0	11	2	2	3
11/06/2014	15791	2000	Não	Não	NOR	0	12	2	2	1
02/05/2014	15530		Sim	Não	MON	1	10	6	2	3

Legenda: NOR – normal, MON – monitorar

Os teores de cromo (Cr), presente nas bombas, motores, válvulas e hastes de cilindros quase não sofreram mudanças. Antes da diálise, os valores maiores que zero foram de 1 ppm, enquanto que depois, a análise mais recente apontou 4 ppm. Os teores de cobre (Cu), que apontam desgaste em bombas, motores e cilindros, diminuíram durante a utilização da filtragem auxiliar. Por outro lado, os teores de ferro (Fe); presente em bombas, atuadores e válvulas; apresentaram tendência em aumentarem e tiveram valores maiores que antes da diálise. Os teores de chumbo (Pb), que indicam desgaste em bombas, praticamente zeraram em todo o período após 25/11. Por fim, os teores de silício (Si), que indicam contaminação por poeira proveniente do solo, apresentaram queda em sua maioria ao utilizar a diálise.

A figura 72 representa um gráfico com os teores dos principais elementos químicos presentes nas bombas e atuadores, ferro e cobre. A tendência de aumento de ferro pode ser pelo fato de a escavadeira trabalhar com minério de ferro. A diminuição dos teores de cobre pode indicar uma diminuição no desgaste nas bombas e atuadores.

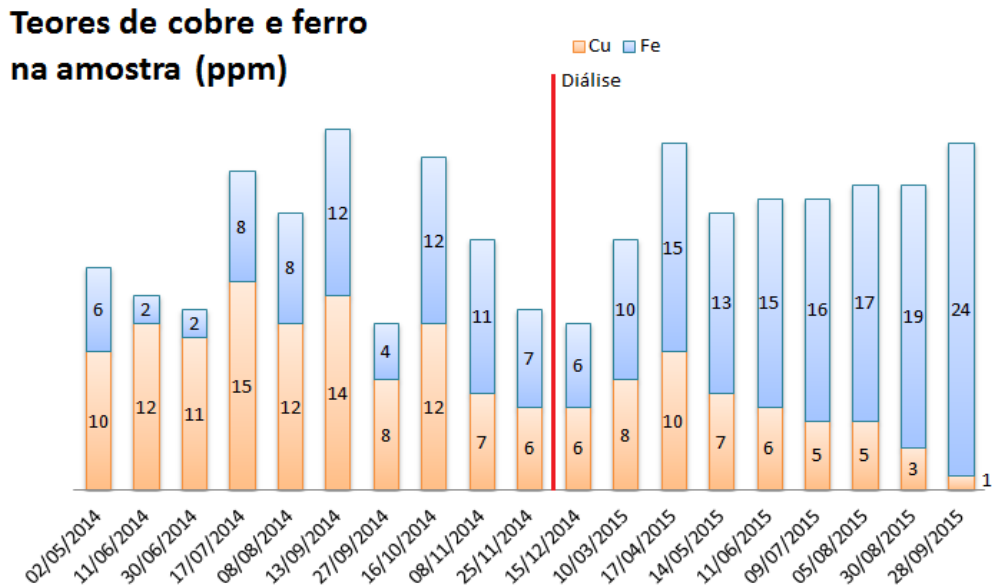


Figura 72 - Teores de cobre e ferro.

Devido à pouca alteração do nível de contaminação do óleo hidráulico, a U&M decidiu retirar o sistema da escavadeira. A tabela 12 mostra os resultados por código ISO. Abaixo da linha azul é o período de utilização da diálise, e acima o período após sua remoção.

Tabela 12 - Resultados de análise por código ISO após a retirada da diálise.

Data da coleta	Horas da máquina	Horas do óleo	Óleo trocado	Troca de filtro	Código de avaliação	ISO4	ISO6	ISO14	Código ISO
15/02/2016	23819	6441	Não	Sim	NOR	19	15	11	19/15/11
15/01/2015	23365	5987	Não	Sim	NOR	21	17	12	21/17/12
06/12/2015	22906	5528	Não	Sim	NOR	22	18	14	22/18/14
28/09/2015	22444	5066	Não	Sim	NOR	20	17	13	20/17/13
30/08/2015	21913	4535	Não	Sim	NOR	21	18	13	21/18/13
05/08/2015	21436	4058	Não	Sim	NOR	22	19	14	22/19/14
09/07/2015	20971	3593	Não	Sim	NOR	19	16	13	19/16/13
11/06/2015	20457	3079	Não	Sim	NOR	19	16	12	19/16/12
14/05/2015	19942	2564	Não	Não	NOR	20	18	16	20/18/16
17/04/2015	19446	2068	Não	Sim	NOR	23	21	13	23/21/13
10/03/2015	18878	1500	Não	Não	NOR	20	16	12	20/16/12
15/12/2014	18382	267	Não	Não	NOR	19	17	14	19/17/14

Legenda: NOR – normal

Os códigos ISO apontaram contaminação sempre abaixo de 18/15. O mais recente ficou em 15/11, o mais baixo de todos os resultados presentes neste trabalho. A contagem de partículas é exibida na tabela 13.

Tabela 13 - Contagem de partículas durante e após a utilização da diálise.

Data da coleta	Horas da máquina	Horas do óleo	Óleo trocado	Troca de filtro	Código de avaliação	4 µm	6 µm	10 µm	14 µm	18 µm	21 µm	38 µm	50 µm
15/02/2016	23819	6441	Não	Sim	NOR	4736	268	44	20	9	7	3	2
15/01/2015	23365	5987	Não	Sim	NOR	15518	913	101	31	16	13	6	4
06/12/2015	22906	5528	Não	Sim	NOR	24532	2182	350	116	53	30	3	2
28/09/2015	22444	5066	Não	Sim	NOR	8221	739	178	73	44	31	7	5
30/08/2015	21913	4535	Não	Sim	NOR	11314	1595	317	80	33	21	5	3
05/08/2015	21436	4058	Não	Sim	NOR	21241	3184	536	156	71	41	2	1
09/07/2015	20971	3593	Não	Sim	NOR	4231	481	142	75	42	32	18	14
11/06/2015	20457	3079	Não	Sim	NOR	4361	429	84	33	16	10	2	1
14/05/2015	19942	2564	Não	Não	NOR	5887	1323	642	473	392	347	201	176
17/04/2015	19446	2068	Não	Sim	NOR	77482	15669	241	51	19	10	0	0
10/03/2015	18878	1500	Não	Não	NOR	6139	537	89	35	18	12	2	1
15/12/2014	18382	267	Não	Não	NOR	3553	1002	333	145	82	62	19	8

Legenda: NOR – normal

Observa-se que a contagem de partículas não sofreu aumento após a retirada da filtragem auxiliar. Esperava-se que houvesse um aumento da contaminação. É importante notar que em todas as coletas desde 11/06/2015 houve troca dos filtros da escavadeira.

Os teores dos elementos químicos encontrados podem ser conferidos na tabela 14.

Tabela 14 - Teores de elementos químicos após a retirada da diálise.

Data da coleta	Horas da máquina	Horas do óleo	Óleo trocado	Troca de filtro	Código de avaliação	Cr	Cu	Fe	Pb	Si
15/02/2016	23819	6441	Não	Sim	NOR	4	4	6	0	1
15/01/2015	23365	5987	Não	Sim	NOR	0	2	9	0	4
06/12/2015	22906	5528	Não	Sim	NOR	2	1	11	4	2
28/09/2015	22444	5066	Não	Sim	NOR	4	1	24	1	0
30/08/2015	21913	4535	Não	Sim	NOR	1	3	19	0	0
05/08/2015	21436	4058	Não	Sim	NOR	1	5	17	0	0
09/07/2015	20971	3593	Não	Sim	NOR	2	5	16	0	0
11/06/2015	20457	3079	Não	Sim	NOR	0	6	15	0	0
14/05/2015	19942	2564	Não	Não	NOR	1	7	13	0	1
17/04/2015	19446	2068	Não	Sim	NOR	2	10	15	0	5
10/03/2015	18878	1500	Não	Não	NOR	1	8	10	0	1
15/12/2014	18382	267	Não	Não	NOR	0	6	6	0	0

Legenda: NOR – normal

Os teores de cobre não sofreram alteração significativa, porém os teores de ferro diminuíram. A concentração de silício não apresentou aumento substancial. Todos os *status* dos resultados após a retirada da diálise permaneceram em *normal*.

#### 4.2. RESULTADOS DA INSPEÇÃO DO FILTRO

Fez-se inspeção do elemento filtrante da diálise, como mostra a figura 73. O filtro, retirado do aparelho após a desinstalação, manteve sua integridade física, não apresentando peças soltas. As dobras do material filtrante não apresentaram ondulações, logo não sofreram altas pressões diferenciais e fluxo pulsado. Não foi encontrada sujidade visível, sendo que a cor amarelada é do óleo e um dos meios é de cor marrom. Não foram encontrados furos no meio filtrante. Com base nestas evidências, o filtro da diálise suporta a carga de trabalho na escavadeira hidráulica por pelo menos 4000 horas.

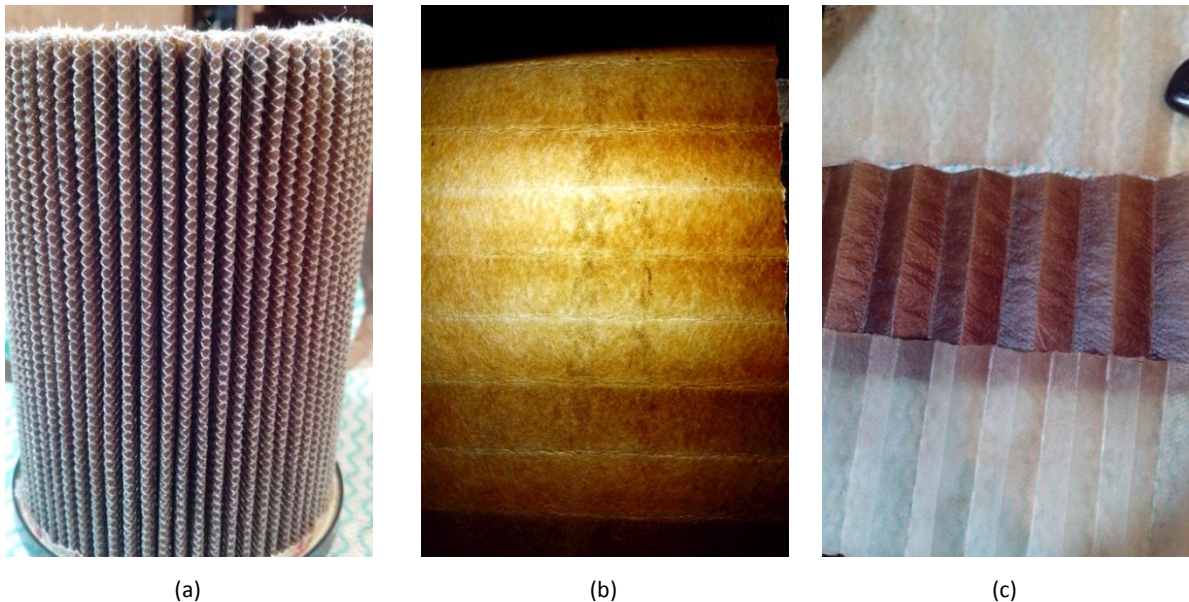


Figura 73 - Estado do filtro. (a) Sem ondulações, (b) sem furos, (c) sem sujidade visível.

Fonte: U&M (2016).

Foi encontrada uma sujeira no fundo do compartimento do filtro, sendo vista na figura 74, resultante de decantação de impurezas. A camada encontrada foi muito fina.





Figura 74 - Impureza decantada no compartimento do filtro.

Fonte: U&M (2015).

#### 4.3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A análise de óleo mostrou resultados aquém do esperado. A intenção ao aplicar a filtragem adicional na escavadeira 4020 era diminuir os níveis de contaminação no óleo hidráulico.

Pelo código ISO, antes e depois da instalação da diálise levando em conta 14 e 6  $\mu\text{m}$ , não houve queda substancial abaixo de 18/15 recomendado pela Empresa S. Quase todos os resultados ficaram em torno de 18/15. Após a remoção, os códigos ficaram todos abaixo do recomendado. Portanto, os resultados pelo código ISO não justificam a utilização da diálise.

A contagem de partículas por 1 mL de fluido também não apresentou queda desejável após o início do funcionamento da diálise. Analisando tamanhos de partículas de 6  $\mu\text{m}$  a 50  $\mu\text{m}$ , nota-se que a contagem apresentou números maiores com a utilização da filtragem auxiliar. O esperado era que a contagem diminuísse para partículas cada vez maiores, pois o filtro da diálise possui 2  $\mu\text{m}$  de ponto de corte. Quanto maiores a partículas, mais nocivas são para o sistema hidráulico. Após a retirada da diálise, não houve aumento da contagem. É possível afirmar que o fluido hidráulico antes da diálise esteve em bom estado durante toda a operação e que os filtros da escavadeira são suficientes para a limpeza do óleo.

Quanto aos elementos químicos estudados, os teores de ferro, principal constituinte dos componentes hidráulicos, não apresentaram diminuição com a diálise. Esperava-se que todos os elementos tivessem teores diminuídos. Os teores após a remoção da filtragem auxiliar não sofreram alterações significativas.

Após o conhecimento dos resultados da análise de fluido e que os níveis de contaminação não baixaram para um patamar esperado, a U&M decidiu retirar o sistema de diálise da 4020 e devolver o aparelho ao fabricante. Monitorando o estado do fluido



hidráulico após a retirada da filtragem auxiliar, conclui-se que a utilização do sistema não seria realmente necessária, pois o nível de contaminação permaneceu com códigos ISO abaixo de 18/15. A contagem de partículas não apresentou aumento e os teores de ferro e cobre não sofreram aumento.

Inspecionando-se o filtro, é possível afirmar que o mesmo apresenta resistência para a operação na escavadeira e que não sofreria danos por no mínimo até 4000 horas.

## 5. CONCLUSÃO

O sistema de diálise *online*, funcionando com o aparelho modelo FOL-15-M-24-DM2-PF da Empresa H, não apresentou resultado esperado sendo aplicado no sistema hidráulico da escavadeira FZ-2399 4020 do fabricante A. Através dos resultados fornecidos pelos instrumentos utilizados apresentados na metodologia, a filtragem não diminuiu os níveis de contaminação do óleo para um valor significativamente abaixo do que era medido antes de a diálise ser instalada. Além disto, após a retirada do sistema, o nível de contaminação do fluido permaneceu baixo. Com isso, a U&M decidiu não expandir o sistema de filtragem auxiliar para outras escavadeiras, pois as mesmas possuem óleo hidráulico em bom estado com código ISO girando em torno de 18/15.

Os baixos níveis de contaminação verificados no período anterior à instalação e após a remoção da diálise indicam que a filtragem original da escavadeira já é suficiente para manter o óleo hidráulico limpo. A troca de filtros hidráulicos da escavadeira a cada 500 horas se mostrou bastante eficaz para o controle de contaminação do óleo.

O monitoramento de nível de contaminação é um método bastante confiável para acompanhamento do estado de um fluido de um sistema. Com ele é possível averiguar a eficácia de uma filtragem, a entrada de contaminação, surgimento de contaminação interna e a origem de partículas em suspensão no óleo.

### 5.1. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Uma recomendação para um estudo mais criterioso com respeito a filtros é a utilização de software de simulação. Com isto pode-se sugerir alternativas de melhorias no projeto.

A realização de testes com o próprio filtro em um laboratório seria de grande valia para verificação da qualidade do mesmo.

Ensaio e testes com as próprias peças constituintes da máquina em teriam grande importância no estudo de desgaste.

## REFERÊNCIAS

BLAU, P. J. et al. **ASM Handbook Volume 18: Friction, Lubrication, and Wear Technology**. ASM International, 1992.

BRAIN, M. How Hydraulic Machines Work. **How Stuff Works**, 01 abr. 2000.

Disponível em: <<http://science.howstuffworks.com/transport/engines-equipment/hydraulic1.htm>>.

Acesso em: 13 jun. 2015.

BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna**, v. 2. São Paulo: Blucher, 2013.

BURAKOWSKI, T.; WIERZCHON, T. **Surface Engineering of Metals: Principles, Equipment, Technologies**. CRC Press LLC, 1999.

CALLISTER Jr., W. D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Abordagem Integrada**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

DANFOSS HYDRAULICS. **Facts worth knowing about hydraulics**. 1998.

Disponível em: <<http://www.bethandevans.com/pdf/HydraulicFactsWorthKnowing.pdf>>.

Acesso em: 27 abr. 2015.

DURFEE, W.; SUN, Z. **Fluid Power System Dynamics**. Department of Mechanical Engineering. University of Minnesota, 2009.

Disponível em: <<http://www.me.umn.edu/~wkdurfee/projects/ccefp/fp-chapter/fluid-pwr.pdf>>. Acesso em: 04 mai. 2015.

FERREIRA, A. C. **Treinamento Básico de Manutenção – Hitachi EX1200-6**. U&M, 2015.

FITCH, B. Anatomy of an Oil Filter. **Machinery Lubrication**, jun. 2013.

Disponível em: <<http://www.machinerylubrication.com/Read/29396/oil-filter-anatomy>>.

Acesso em: 22 nov. 2015.

FITCH, J. Recognizing the Causes and Hazards of Silt Lock. **Machinery Lubrication**, fev. 2015.

Disponível em: <<http://www.machinerylubrication.com/Read/30091/recognizing-silt-lock>>.

Acesso em: 01 dec. 2015.

**HYDAC. Filtration Handbook.**

Disponível em:

<<http://www.hydac.com.au/MessageForceWebsite/Sites/279/Files/E.7.011.1.03.12.pdf>>.

Acesso em: 01 dec. 2015.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials.**

Butterworth-Heinemann, 1992.

JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. **Fundamentos do Projeto de Máquinas e Componentes.** 4. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

KARDEC, A.; NASCIF, J. A. **Manutenção, Função Estratégica.** Rio de Janeiro: Qualitymarck Ed., 2001.

LINSINGEN, I. **Fundamentos de Sistemas Hidráulicos.** 4. ed. Florianópolis: Editora UFSC, 2013.

MOURA, C. R. S., CARRETEIRO, R. P. **Lubrificantes e Lubrificação.** 2. ed. Rio de Janeiro: JR Editora Técnica Ltda, 1987.

NORIA CORPORATION. Hydraulic Systems and Fluid Selection. **Machinery Lubrication**, jan. 2002.

Disponível em: <<http://www.machinerylubrication.com/Read/277/hydraulic-systems-fluid>>.

Acesso em: 09 jun. 2015.

NORIA CORPORATION. How Important is the ISO Cleanliness Code in Oil Analysis?. **Machinery Lubrication**, jun. 2012.

Disponível em: <<http://www.machinerylubrication.com/Read/28979/iso-cleanliness-code>>.

Acesso em: 04 jul. 2015.

NORIA CORPORATION. The Low-Down on Particle Counters. **Practicing Oil Analysis**, jul. 2002.

Disponível em: <<http://www.machinerylubrication.com/Read/351/particle-counters>>.

Acesso em: 9 jul. 2015.

PARKER. **A guide to contamination control for hydraulic & lubrication systems**. 2006.

Disponível em:

<<http://www.parker.com/literature/Hydraulic%20Filter%20Division%20Europe/fdhb138gb1.pdf>>.

Acesso em: 22 nov. 2015.

RINGHOLM, E. Understanding Filter Beta Ratios. **Practicing Oil Analysis**, fev. 2004.

Disponível em: <<http://www.machinerylubrication.com/Read/564/filter-beta-ratios>>.

Acesso em: 23 dez. 2015.

SEFWAT, A. Filter Analysis Describes the History of Wear. **Practicing Oil Analysis**, nov. 2008.

Disponível em: <<http://www.machinerylubrication.com/Read/1770/filter-analysis-wear>>.

Acesso em: 1 dez. 2015.

SILVA, J, C, J. **Fundamentos de Espectrometria de Massa com Fonte de Plasma (ICP-MS)**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Instituto de Ciências Exatas, Depto. de Química, 2009.

Disponível em: <[http://www.ufjf.br/baccan/files/2011/07/Seminario\\_ICP-MS\\_UFV\\_22\\_10\\_09.pdf](http://www.ufjf.br/baccan/files/2011/07/Seminario_ICP-MS_UFV_22_10_09.pdf)>.

Acesso em: 12 jan. 2016.

SOTREQ. **Programa S.O.S. – Análise Proativa de Fluidos**. 2011.

Disponível em: < [http://sotreq.com.br/wordpress/wp-content/uploads/2013/05/Manual\\_SOS\\_Sotreq.pdf](http://sotreq.com.br/wordpress/wp-content/uploads/2013/05/Manual_SOS_Sotreq.pdf)>.

Acesso em: 23 nov. 2015.

STEWART, H. L. **Pneumática & Hidráulica**. 3. ed. Curitiba: Hemus, 1994.

SUTHERLAND, K. **Filters and Filtration Handbook**. 5. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2008.

TESSMANN, R. K.; HONG, I, T. Fluid Cleanliness and Filtration. In: TOTTEN, G. E. **Handbook of Hydraulic Fluid Technology**. Nova Iorque: Marcel Dekker, Inc, 2000. Capítulo 3, p. 147-190.

## ANEXO 1 – TERMO DE AUTENTICIDADE



UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
FACULDADE DE ENGENHARIA

### Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria

Declaro, sob as penas da lei e para os devidos fins, junto à Universidade Federal de Juiz de Fora, que meu Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia de Produção é original, de minha única e exclusiva autoria. E não se trata de cópia integral ou parcial de textos e trabalhos de autoria de outrem, seja em formato de papel, eletrônico, digital, áudio-visual ou qualquer outro meio.

Declaro ainda ter total conhecimento e compreensão do que é considerado plágio, não apenas a cópia integral do trabalho, mas também de parte dele, inclusive de artigos e/ou parágrafos, sem citação do autor ou de sua fonte.

Declaro, por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral<sup>1</sup> e criminais previstas no Código Penal<sup>2</sup>, além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 20\_\_\_\_.

\_\_\_\_\_  
NOME LEGÍVEL DO ALUNO (A)

\_\_\_\_\_  
Matrícula

\_\_\_\_\_  
ASSINATURA

\_\_\_\_\_  
CPF

<sup>1</sup> LEI N° 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.

<sup>2</sup> Art. 184. Violar direitos de autor e os que lhe são conexos: Pena - detenção, de 3 (três) meses a 1 (um) ano, ou multa.

**ANEXO 2 – DECLARAÇÃO DA EMPRESA**

Declaro para os devidos fins, que Felipe Pellegrino de Oliveira, estagiário da empresa U&M Mineração e Construção S/A, possui autorização para divulgar o nome da empresa U&M Mineração e Construção S/A bem como dados não confidenciais na elaboração de seu trabalho de conclusão de curso, apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Juiz de Fora, 9 de março de 2016.

---

Responsável da Empresa  
(carimbo da empresa)