

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

**MONITORAMENTO DE CONTAMINANTES NO SISTEMA
HIDRÁULICO DAS HARVESTERS DA ARACRUZ
CELULOSE, ATRAVÉS DA MICROFILTRAGEM RADIAL**

AUTIERI STEFANELLI GUIMARÃES

**VITÓRIA – ES
JULHO/2006**

AUTIERI STEFANELLI GUIMARÃES

**MONITORAMENTO DE CONTAMINANTES NO SISTEMA
HIDRÁULICO DAS HARVESTERS DA ARACRUZ
CELULOSE, ATRAVÉS DA MICROFILTRAGEM RADIAL**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação
do aluno Autieri Stefanelli Guimarães,
apresentado ao Departamento de
Engenharia Mecânica do Centro
Tecnológico da Universidade Federal do
Espírito Santo, para obtenção do grau de
Engenheiro Mecânico.

**VITÓRIA – ES
JULHO/2006**

AUTIERI STEFANELLI GUIMARÃES

**MONITORAMENTO DE CONTAMINANTES NO SISTEMA
HIDRÁULICO DAS HARVESTERS DA ARACRUZ
CELULOSE, ATRAVÉS DA MICROFILTRAGEM RADIAL**

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Osvaldo Paiva Almeida Filho
Orientador

Prof. Marcos Aurélio Scopel Simões
Examinador

Prof. Fernando César Meira Menandro
Examinador

Vitória - ES, 20 de Julho de 2006.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, irmãos, namorada, familiares e amigos.
Sem vocês nada disso seria possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica que contribuíram para meu crescimento intelectual. Agradeço também ao orientador Osvaldo Paiva pelas lições de vida ensinadas durante o curso.

Agradeço aos meus pais por terem me ensinado a gostar de estudar e aprender, o que foi muito importante para concluir mais essa etapa da minha vida.

Agradeço também ao meu irmão, familiares e amigos pelas horas de descontração e alegria dentro e fora da UFES.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1. Desgaste em um mancal deslizante.....	13
Figura 1-2. Ilustração de desgaste erosivo em uma válvula.....	14
Figura 1-3. Ilustração de desgaste erosivo em uma válvula	15
Figura 1-4. Efeito do óleo com Água na Vida do Rolamento.....	15
Figura 1-5. Classe ISO 4406 de limpeza - Hydac.	17
Figura 1-6. Classe NAS 1638 de limpeza - Hydac.....	18
Figura 1-7. Ilustração da Classe NAS 5.....	18
Figura 1-8. Ilustração da Classe NAS 7.....	19
Figura 1-9. Ilustração da Classe NAS 9.....	19
Figura 1-10. Ilustração da Classe NAS 12.....	20
Figura 1-11. Níveis de limpeza para componentes hidráulicos Hydac International..	21
Figura 1-12. Fator de expectativa de vida para sistemas hidráulicos	22
Figura 1-13. Esquema de teste de multiplas passagens ISO 16889.....	24
Figura 1-14. Tabela ilustrativa de um teste ISO 16889	24
Figura 1-15. Tabela ilustrativa da Razão Beta x Eficiência	25
Figura 2-1. Filtro by-pass RMF	27
Figura 2-2. Filtro by-pass instalado na Komatsu 02.....	28
Figura 2-3. Dimensões do filtro by-pass.....	29
Figura 2-4. Desenho do elemento filtrante	30
Figura 2-5. Elemento filtrante do filtro RMF	31
Figura 3-1. LASPAC I (Contador de Partículas a laser)	34
Figura 3-2. Filtro bu-pass RMF instalada na Komatsu 02	35
Figura 3-3. Harvester Komatsu 02.....	35
Figura 3-4. Cabine de controle do processador Harvester Komatsu 02	37
Figura 3-5. Tabela de monitoramento da contaminação nas Harvesters.....	37
Figura 3-6. Gráfico de tendência da Komatsu 02	38
Figura 3-7. Gráfico de tendência da Volvo 14	39

SIMBOLOGIA

μm – medida utilizada na contagem de partículas.

β_x – Critério utilizado para classificar o elemento filtrante.

LISTA DE ABREVIATURAS

TAN – Número Total Ácido.

NAS 1638/64 – National Aerospace Standard 1638 de 1964.

ISO 4406/1999 – International Organization for Standardization - Hydraulic fluid power - Fluids - Method for coding the level of contamination by solid particles.

RMF – Radial Micro Filtration.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	I
AGRADECIMENTOS	II
LISTA DE FIGURAS.....	III
SIMBOLOGIA.....	IV
LISTA DE ABREVIATURAS.....	V
SUMÁRIO	VI
SUMÁRIO	VI
RESUMO	VIII
1 PROGRAMA DE CONTROLE DE CONTAMINAÇÃO	9
1.1 Introdução.....	9
1.2 Tipos e Fontes de Contaminação	10
1.3 Danos causados pela contaminação	11
1.4 Níveis de limpeza do fluido	16
1.5 Objetivo de níveis de limpeza	20
1.6 Eficiência do filtro.....	23
1.7 Medições de limpeza do fluido	25
1.8 Conclusão	26
2 FILTRO BY-PASS RMF UTILIZADO NA HAVESTER.....	26
2.1 Introdução.....	26
2.2 Dimensões e dados técnicos.....	27
2.3 Elemento Micro Filtrante	30
2.4 Características e vantagens do sistema by-pass RMF	31
2.5 Conclusões	32
3 TESTE DO SISTEMA DE FILTRAGEM DA HARVESTER.....	32
3.1 Introdução.....	32
3.2 Definições.....	33
3.3 Resultados	37
3.4 Conclusão	39

4	CONCLUSÕES	39
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	41

RESUMO

O conceito do sistema de controle de contaminação correta para um sistema hidráulico é um dos fatores fundamentais que irá aumentar a performance operacional de um equipamento. A seleção apropriada e a instalação de dispositivos de controle de contaminação em um sistema para obter e manter o nível de limpeza pretendido eliminará a causa principal de falhas no sistema hidráulico.

Além disso, o custo do sistema de controle de contaminação pode ser economicamente justificado pela economia gerada pela melhor performance do sistema, menor número de horas paradas e o aumento da vida útil dos componentes.

O propósito deste projeto de graduação é fazer a análise de um projeto real utilizando a manutenção preditiva (também conhecida como monitoramento da condição operacional) através de um filtro by-pass RMF com o princípio de micro filtragem radial nas Harvesters da Aracruz Celulose que cortam eucaliptos para a produção de celulose. Com uma frota em torno de 100 colheitadeiras e gastos elevados com manutenção, a coordenação de manutenção da Aracruz Celulose da área florestal que engloba a empresa Aliança Florestal (Volvo) e a empresa Komatsu (Valmet), resolveram testar a eficácia deste dispositivo de controle de contaminação. A técnica de redução da contaminação sólida pela filtragem consistia em verificações semanais das condições do fluido através da utilização de contadores de partículas on-line e coleta de amostra do fluido do sistema efetuando análise posterior em um laboratório. Essas análises regulares do óleo vão ajudar a garantir que o sistema esteja trabalhando satisfatoriamente, e que o nível de limpeza especificado esteja sendo mantido.

O controle de contaminação através da filtragem by-pass RMF (micro filtragem radial) gera limpeza no fluido e confiabilidade no sistema. Evita falhas do equipamento devido à contaminação do fluido, reduzindo custos devido há horas paradas e despesas com concerto.

1 PROGRAMA DE CONTROLE DE CONTAMINAÇÃO

1.1 Introdução

Neste capítulo, serão abordadas algumas características e explicados os motivos para o desenvolvimento e entendimento do Programa de Controle de Contaminação.

É essencial desenvolver este tipo de controle para reduzir a vida do sistema, pois gera confiabilidade ao seu sistema. Pode ser atingidos utilizando sistemas de filtragem adequados e verificados através de monitoramento constantes determinando a limpeza.

É geralmente aceito que 75% a 80% de todas as falhas em sistemas hidráulicos podem ser atribuídas à contaminação. A presença de particulados e outros contaminantes como água e ar em um sistema hidráulico, afetam seriamente a vida dos componentes do sistema e freqüente são freqüentemente causas de falhas prematuras. A veracidade de falhas devido à contaminação é enfatizada abaixo.

- A) De acordo com a Caterpillar, “sujeira e contaminação são de longe a causa número um das falhas do sistema hidráulico”. A J. I. Case diz que “uma coisa é verdadeira sobre sistemas hidráulicos: os sistemas devem ser mantidos limpos — imaculadamente limpos — a fim de atingir a produtividade de que são capazes” (FITCH, 1991).
- B) O Massachusetts Institute of Technology declara que “seis a sete por cento do produto nacional bruto (US\$ 240 bilhões) é requerido somente para reparar avarias causadas por desgaste mecânico”. O desgaste ocorre como resultado da contaminação (FITCH, 1991).
- C) A Oklahoma State University relata que quando o fluido é mantido 10 vezes mais limpo a vida das bombas hidráulicas é aumentada 50 vezes (FITCH, 1991).

O fator mais importante que rege o nível de limpeza do sistema é o sistema de filtragem e o seu desempenho. A seleção dos filtros deve levar em consideração a

severidade do trabalho e os padrões de manutenção. A única forma de confirmar se você escolheu os filtros corretos é monitorar o nível de contaminação de fluido.

O controle de contaminação gera limpeza e confiabilidade no sistema. Além disso, proporciona menor freqüência de trocas de óleo, maior vida útil do óleo e menos horas de máquina parada.

1.2 Tipos e Fontes de Contaminação

Contaminantes em fluido hidráulico podem ter a forma sólida, líquida ou gasosa. Partículas contaminantes sólidas vêm de três fontes principais e podem variar consideravelmente de forma e tamanho, de micrômetro até milímetros.

Contaminantes Sólidos advindos da construção: Todos os sistemas novos contêm algum contaminante gerado durante a produção e montagem. Eles podem consistir de fibras (retalhos de pano), areia de fundição, descamação dos tubos, solda de metais ou outras partículas de metal, material de juntas ou pinturas descascadas.

Contaminantes Sólidos adicionados: Contaminantes podem ser adicionados ao sistema hidráulico com óleo novo. Este contaminante pode ser altamente abrasivo. O sistema pode também ser contaminado através da película de fluido sobre a haste do êmbolo devido à vedação danificada. Contaminação será admitida se as aberturas do reservatório não forem seladas e se o reservatório não estiver equipado com um filtro respiradouro de ar.

Contaminantes Sólidos gerados: Durante a operação normal de qualquer sistema hidráulico, pequenas partículas geradas com o desgaste das superfícies dos componentes. Estas partículas podem ser um dos mais perigosos contaminantes para o sistema hidráulico porque elas são endurecidas pelo trabalho até uma dureza superior ao das superfícies de que elas provem. Estas pequenas partículas vão se juntar ao processo de desgaste gerando elevados níveis de contaminação. É muito importante capturar partículas de desgaste rapidamente antes que elas causem danos adicionais.

Contaminantes Líquidos: Depois do desgaste da superfície dos componentes, a presença de contaminante líquido é a maior causa dos problemas relacionados com contaminação. Isto pode ocorrer diretamente através da corrosão ou indiretamente

através da interação do líquido contaminante com o fluido hidráulico. Estes contaminantes reduzem a eficácia do fluido e por isso aumentam a taxa de desgaste dos componentes, ou reagem com o fluido gerando produtos insolúveis que podem bloquear os filtros, espaços etc.

Água é o contaminante líquido mais comum em sistemas que utilizam fluidos minerais ou sintéticos e pode ser resultado de ingresso no sistema a partir da atmosfera, de trocadores de calor com vazamento e de condensação. É essencial que a quantidade de água seja mantida a níveis bem inferiores ao da solubilidade ou dos níveis de saturação do fluido usado. A adição do mesmo em pequenas proporções no fluido irá diminuir significativamente a viscosidade e a capacidade do fluido de sustentar cargas. Existem muitos componentes nos sistemas hidráulicos onde esta deterioração da lubrificação é de grande importância.

Contaminação pelo Ar: Quase todos os fluidos contêm algum ar dissolvido. Sob pressão os fluidos hidráulicos normalmente contém 80% de seu volume como ar dissolvido que neste estado não causa nenhum problema. Aumentando a pressão sobre o fluido hidráulico aumentará o volume de ar que pode ser dissolvido enquanto em zonas de baixa pressão partes deste ar dissolvido serão liberadas em forma de bolhas, um estado freqüentemente encontrado abaixo das válvulas de alívio.

1.3 Danos causados pela contaminação

Um dos propósitos do fluido hidráulico em um sistema é criar um filme lubrificante para manter partes com tolerâncias muito pequenas separadasumas das outras. Este filme deve ser grosso o suficiente para preencher completamente o espaço entre as partes.

Quando esta situação ocorre, a taxa de desgaste será baixa e a vida útil dos componentes será maximizada. A maioria dos componentes é projetada para sobreviver a milhões de ciclos de trabalho. A espessura do filme lubrificante depende de vários parâmetros. Viscosidade do fluido, pressão de trabalho e velocidade relativa de duas superfícies. Em alguns sistemas e componentes as cargas mecânicas são tão elevadas que elas espremem as camadas até uma espessura que pode ser menor que

um micrômetro. O filme de óleo pode ser facilmente perfurado pela aspereza da superfície ou por partículas passando pela camada. Isto resultará em um contato superfície com superfície que pode proporcionar resultados muito danosos.

Os seguintes problemas podem ser criados por esta contaminação:

- 1 – Bloqueio de orifícios;
- 2 – Desgaste de componentes;
- 3 – Corrosão e degradação do fluido;
- 4 – Formação de composto químico;
- 5 – Crescimento biológico.

1 – Estes pequenos orifícios são essenciais para a operação da maioria dos componentes hidráulicos e podem ser bloqueados facilmente com uma pequena partícula contaminante na faixa de 1 a 5 mm. Este bloqueio irá causar falha nos componentes hidráulicos e o sistema perderá a funcionalidade.

2 – O desgaste de componentes pode ser abrasivo, erosivo, adesivo ou na forma de fadiga de material.

O desgaste abrasivo acontece quando o material é removido ou deslocado da superfície por partículas duras que podem estar soltas, entre duas superfícies com movimento relativo, ou emergindo de uma das superfícies, neste caso pertencentes a ela. No caso das partículas estarem soltas, a abrasão é considerada a “três corpos”, onde as partículas duras são livres para rolarem e escorregarem entre as duas superfícies. No caso das partículas emergirem de uma das superfícies, a abrasão é considerada a “dois corpos”.

O desgaste abrasivo pode envolver deformação plástica e fratura frágil, gerando perda ou deslocamento de material por microsulcamento, microcorte ou microlascamento, causados por partículas de elevada dureza relativa. O microsulcamento acarreta em deslocamento de matéria para as laterais do sulco formado, enquanto o microcorte e o microlascamento acarretam em perda de material, gerando também sulcos.

Os efeitos deste tipo de desgaste geram, alterações dimensionais, vazamentos, baixa eficiência e geração de novas partículas e aceleração do processo de desgaste. Por isso é essencial remover as partículas nesta faixa de tamanho, que são aquelas iguais ou um pouco maiores que o espaço entre os componentes.

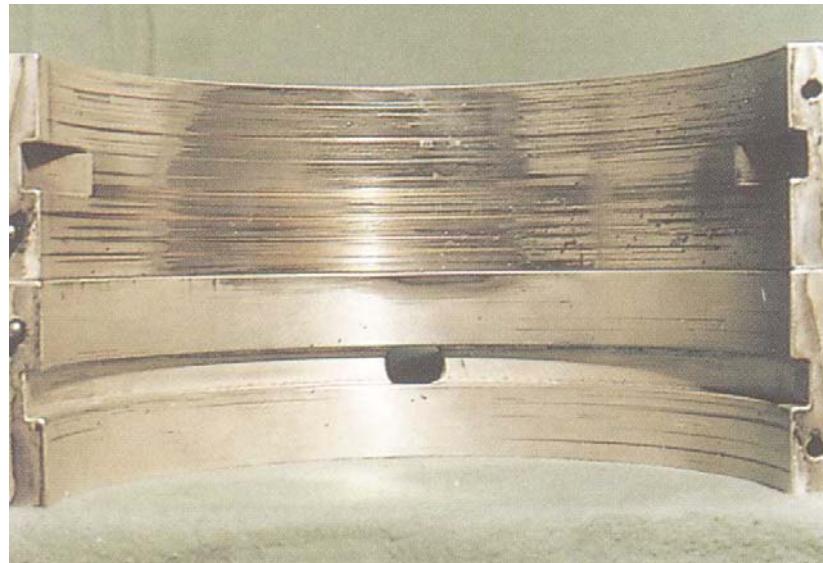


Fig 1.1 - Desgaste em um mancal deslizante

O desgaste erosivo é causado por partículas em suspensão no fluido que atacam a superfície ou os cantos de um componente removendo material desta superfície, depende também do ângulo de impacto com a superfície. Servo-válvulas e válvulas proporcionais são particularmente sensíveis a esta forma de desgaste.

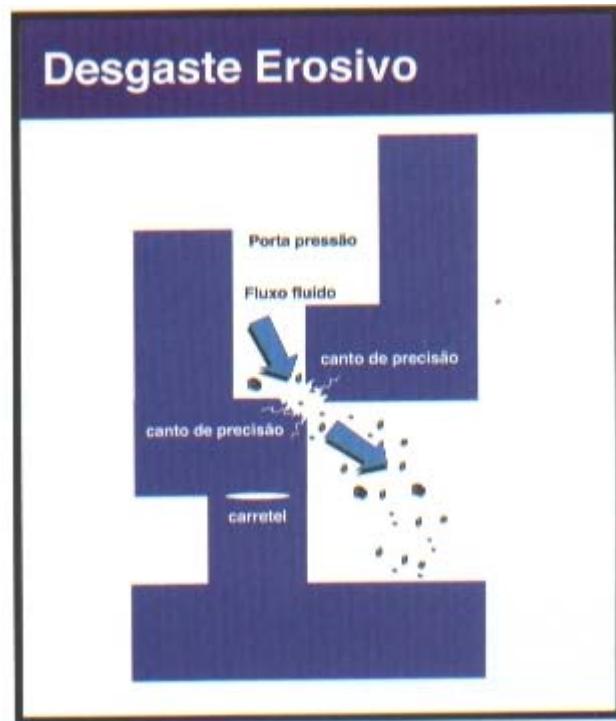


Fig 1.2 – Ilustração de desgaste erosivo em válvulas

O desgaste por adesão ocorre, geralmente, a baixas velocidades e/ou reduções na viscosidade do fluido podem reduzir a espessura do filme de óleo até o ponto onde o contato metal com metal ocorre. Superfícies são “soldadas a frio” e então elas se atritam quando se movem, gerando partículas.

No desgaste por fadiga as superfícies dos componentes hidráulicos estão sob constante ataque por impacto de partículas. Isto causa uma deterioração gradual evoluindo para trincas na superfície. Eventualmente esta superfície irá romper-se e o material irá se soltar produzindo fragmentos.

3 – O desgaste por corrosão é uma forma muito agressiva de desgaste. Quando água entra no sistema os aditivos anti-desgaste se quebram formando ácidos. A combinação de água, calor e diferentes metais aceleram a ação galvânica. O resultado deste processo é o surgimento de superfícies de metal ponteadas e corroídas.

Outro efeito da água é degradar o fluido, produzindo ácidos que corroem as superfícies. Este processo será acelerado na presença de metais quimicamente reativos como cobre e ferro. A maioria dos fluidos tem um inibidor para retardar esse processo, mas a taxa de degradação vai se acelerar e a vida útil do fluido se reduzirá

substancialmente quando estes inibidores estiverem vencidos. Isto pode ser observado na tabela 1, que mostra os efeitos de metais e água na vida útil do fluido como medido através da quantidade de produtos ácidos, conhecidos como TAN (Número Total Ácido).

TESTE	CATALIZADOR	ÁGUA ADICIONADA	VIDA ÓLEO (hrs)	TAN
1	NENHUM	NÃO	3500 +	0,17
2	NENHUM	SIM	3500 +	0,9
3	FERRO	NÃO	3500 +	0,65
4	FERRO	SIM	400	8,1
5	COBRE	NÃO	3000	0,89
6	COBRE	SIM	100	11,2

Fig 1.3 – Efeito da água e catalizador na oxidação do óleo

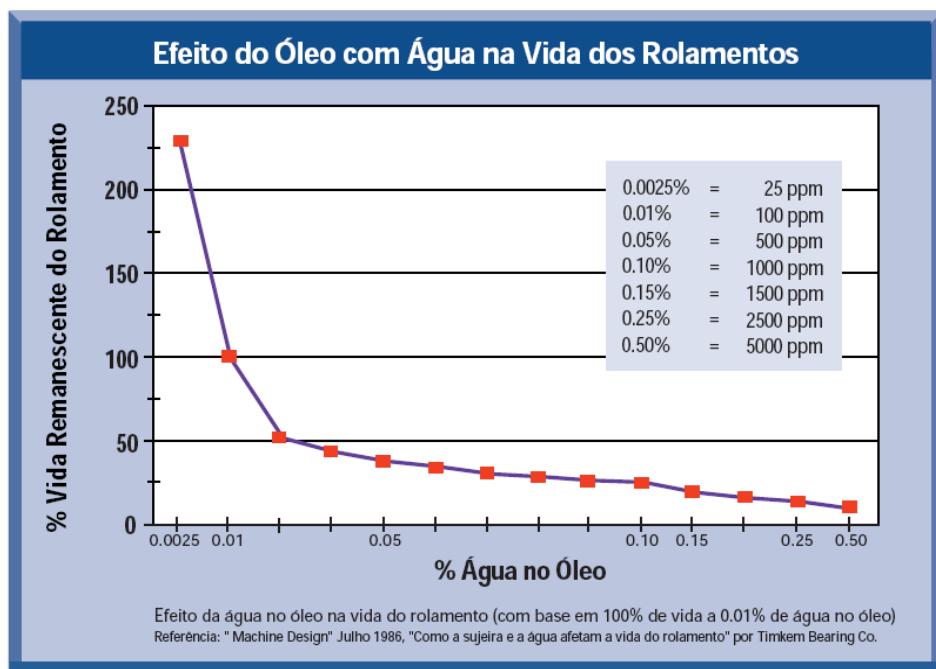


Fig 1.4 – Efeito do óleo com Água na Vida dos Rolamentos

4 – Existem várias reações entre os componentes do sistema e estas partículas. Essas reações químicas que ocorrem entre as partículas e o fluido ou os seus aditivos

provocam a redução na vida útil do fluido e do sistema. Quando uma filtragem apropriada é aplicada, os contaminantes na forma de particulados e água são eliminados reduzindo ou eliminando completamente a formação de compostos químicos.

5 – Micróbios podem ser extremamente problemáticos em sistemas hidráulicos. Alguns micróbios comuns encontrados em sistemas hidráulicos industriais são bactérias, algas e fungos. Estes organismos têm tamanhos variando entre uma única célula até 100 µm. Água e ar são essenciais para seu crescimento e devem ser impedidos de entrar nos sistemas. Quando encontrados devem ser removidos imediatamente. Os micróbios geram um óleo com um cheiro ácido, a viscosidade aumentará, os elementos serão obstruídos mais rápido que o normal, a vida útil do fluido será diminuída, óleo terá aparência iodosa e haverá um aumento na presença de sedimentos.

1.4 Níveis de limpeza do fluido

O nível de contaminação do fluido é medido por uma escala de referência de contaminação. Contagem de partículas é a forma mais comum de expressar padrões de limpeza. O termo quantitativo para especificar o grau de contaminação por partículas sólidas é baseado em algumas normas, sendo a ISO 4466/1999 e a NAS 1638/1964 as mais utilizadas.

A ISO 4466 é o método preferido de citar o número de partículas sólidas contaminantes em uma amostra. O código é formado pela combinação de 3 escalas de números selecionados a partir da seguinte tabela.

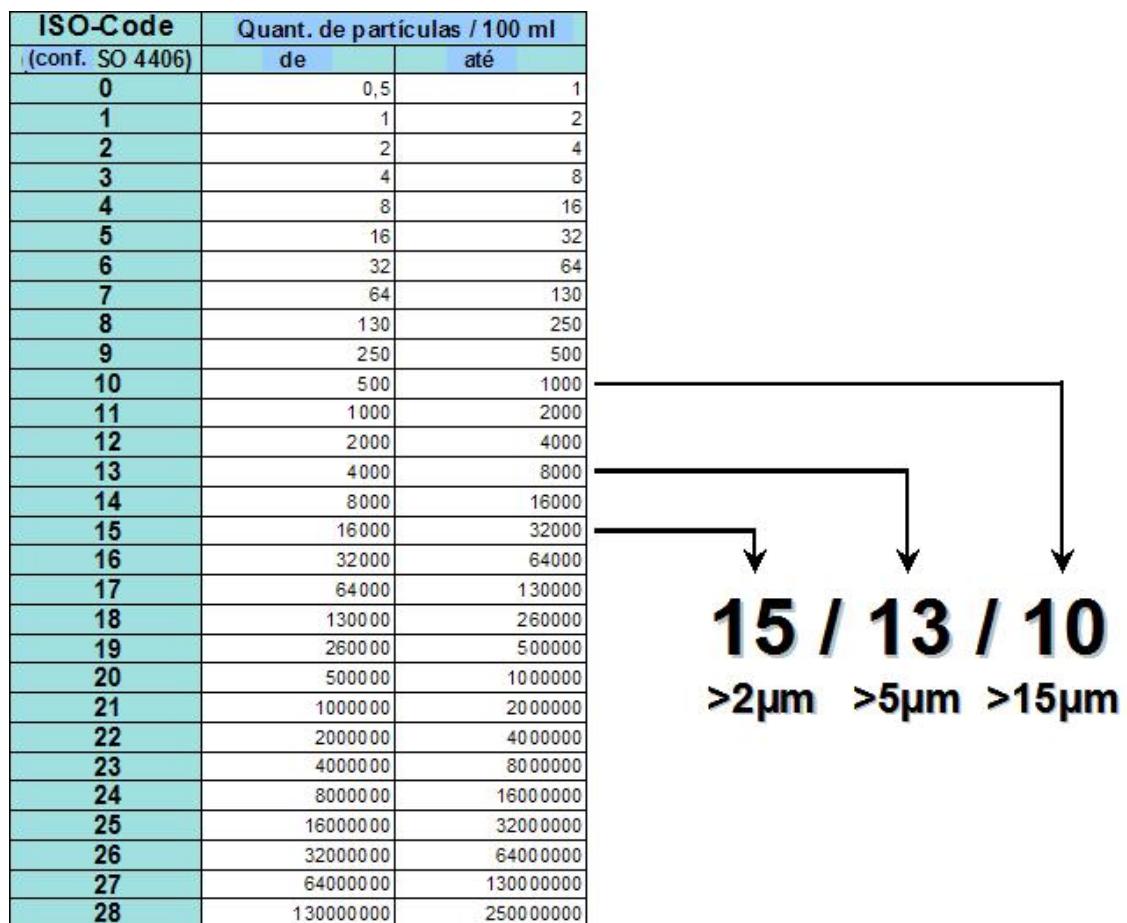


Fig 1.5 – Classe ISO 4406 de Limpeza - Hydac

NAS 1638 (National Aerospace Standard)

O sistema NAS foi originalmente desenvolvido em 1964 para definir classes de contaminação para componentes de aviação. A aplicação desta norma foi estendida para sistemas hidráulicos industriais simplesmente pelo fato de que nada mais existia naquela época.

NAS-Code (conf. NAS 1638)	Quantidade de partículas / 100 ml					
	2 - 5 µm	5 - 15 µm	15 - 25 µm	25 - 50 µm	50 - 100 µm	>100 µm
00	625	125	22	4	1	0
0	1250	250	44	8	2	0
1	2500	500	88	16	4	1
2	5000	1000	176	32	8	1
3	10000	2000	352	64	16	2
4	20000	4000	704	128	32	4
5	40000	8000	1408	256	64	8
6	80000	16000	2816	512	128	16
7	160000	32000	5632	1024	256	32
8	320000	64000	11264	2048	512	64
9	640000	128000	22528	4096	1024	128
10	1280000	256000	45056	8192	2048	256
11	2560000	512000	90112	16384	4096	512
12	5120000	1024000	180224	32768	8192	1024
13	-	2048000	360448	65536	16384	2048
14	-	4096000	720896	131072	32768	4096

Fig. 1.6 – Classe NAS 1638 – Hydac

Segue para visualização algumas figuras ilustrando as classes de contaminação.

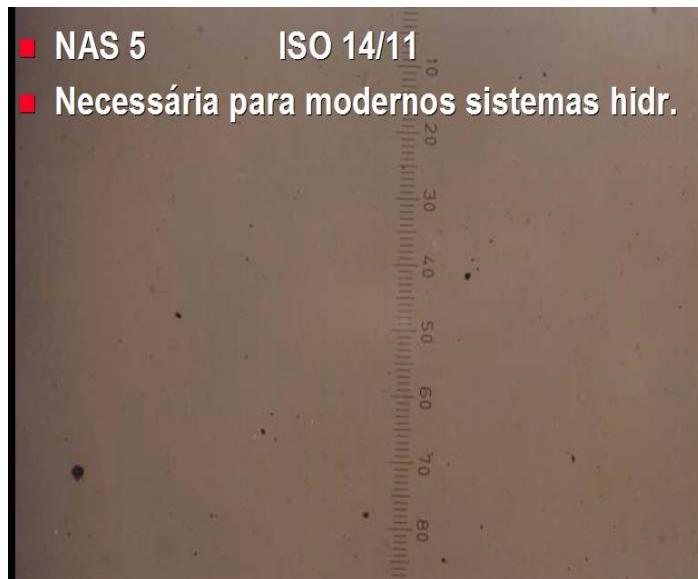


Fig 1.7 – Ilustração da Classe NAS 5

- NAS 7 ISO 15/13
- Óleo novo, fornecido em minicontainers

19

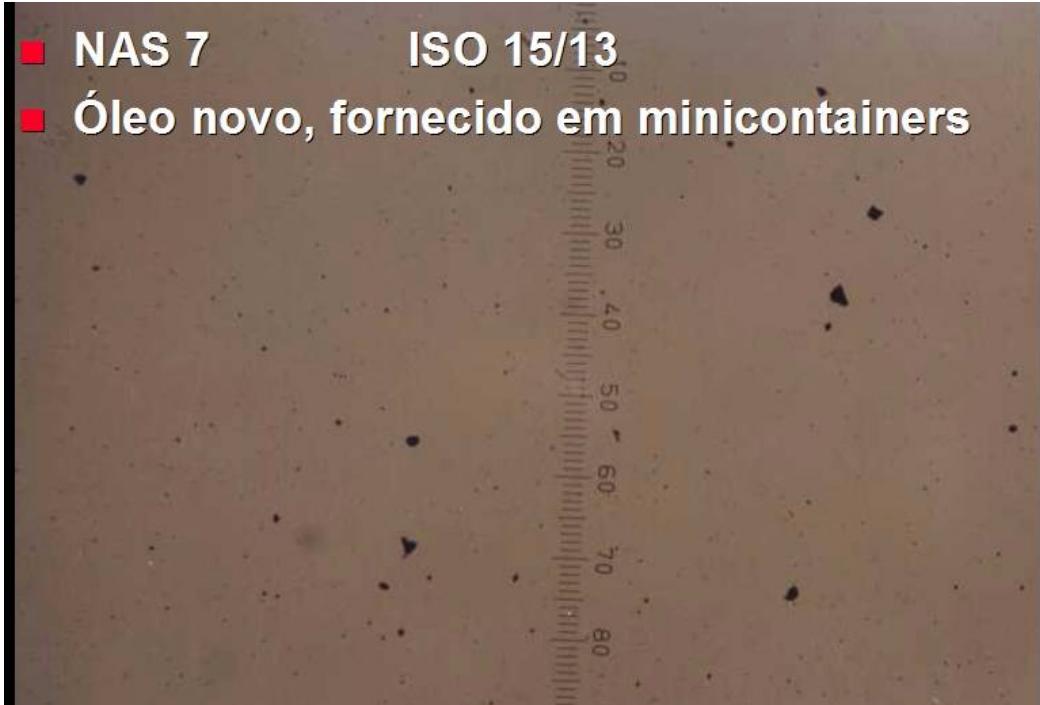


Fig 1.8 – Ilustração da Classe NAS 7

- NAS 9 ISO 18/15
- Óleo novo, fornecido em caminhão tanque

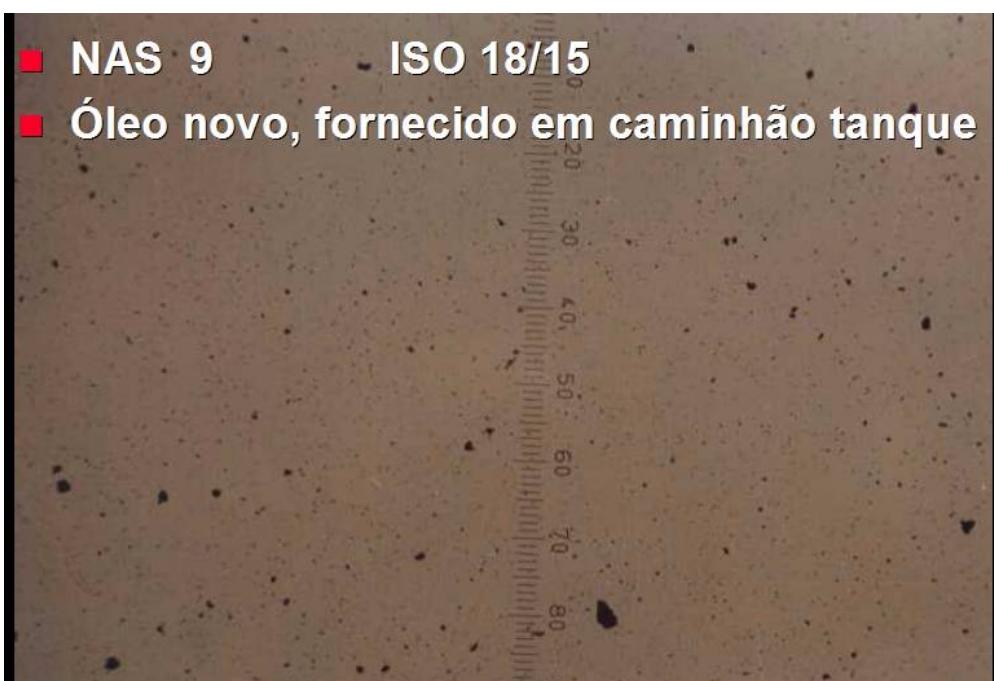


Fig 1.9 – Ilustração da Classe NAS 9

- NAS 12 ISO 21/18
- Óleo novo, fornecido em tambores

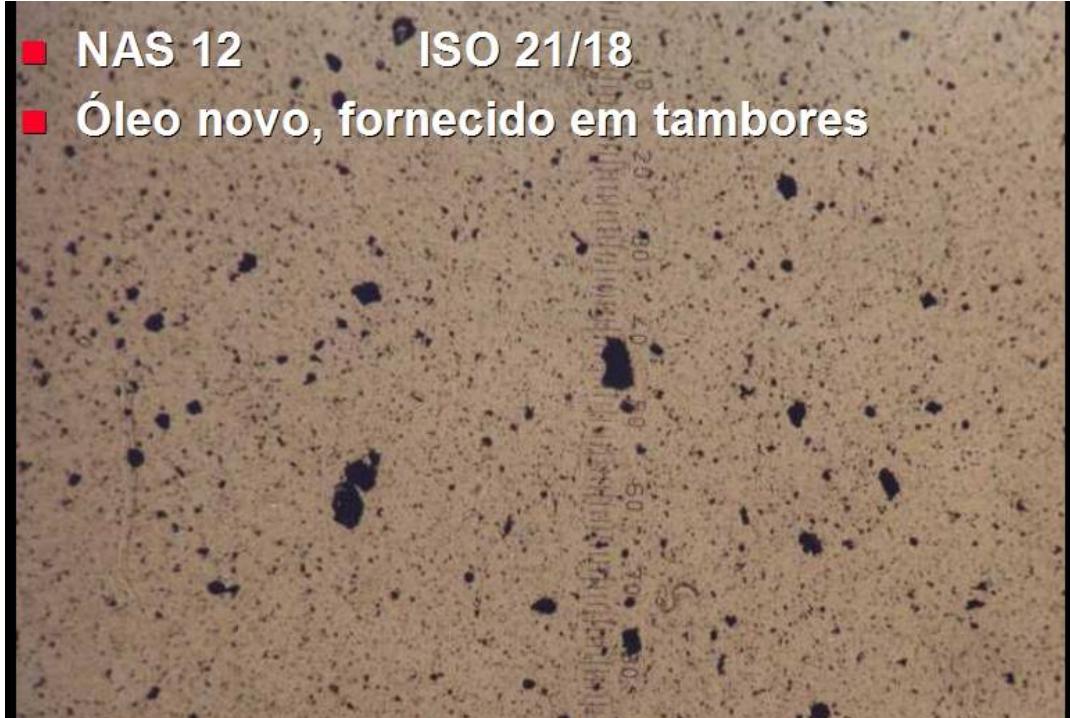


Fig 1.10 – Ilustração da Classe NAS 12

1.5 Objetivo de níveis de limpeza

A quantidade de contaminação com a qual um sistema pode operar com sucesso depende de 2 fatores, que algumas vezes parecem estar em conflito.

- A sensibilidade relativa dos componentes aos contaminantes;
- O nível de confiabilidade e a vida útil dos componentes requerida pelo usuário;

Como projetista ou usuário é necessário selecionar o nível de limpeza mais apropriado para os seus sistemas e o significado que isto representa. O processo começa com uma revisão cuidadosa do sistema.

- A Fig. [1.10] fornece uma seleção de níveis máximos de contaminação para diferentes tipos de componentes.

Componentes hidráulicos	Classe de pureza até		Grau de filtr. absoluto recomendado [µm]
	NAS 1638	ISO DIS 4406	
Bombas de engrenagem	9	21/18/15	10
Cilindros	9	21/18/15	10
Válvulas direcionais	9	21/18/15	10
Válvulas lim. de pressão	9	21/18/15	10
Válvulas estranguladoras	9	21/18/15	10
Bombas de pistões	9	21/18/15	10
Bombas de palhetas	9	21/18/15	10
Válvulas de pressão	6-8	19/16/13	5
Válvulas proporcionais	6-8	19/16/13	5
Servoválvulas	4	16/13/10	3
Servocilindros	4	16/13/10	3

Fig 1.11 – Níveis de limpeza para componentes hidráulicos - Hydac International

Trabalhando a figura 1.10 acima e avaliando os componentes do seu sistema, podemos estabelecer um objetivo de nível de limpeza. A taxa de filtragem selecionada é aceitável se o nível de limpeza requerido for atingido.

Nível de limpeza ISO 4406 – Fator de expectativa de vida para sistemas hidráulicos.

A	B	Fator de Expectativa de Vida									
		>	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nível de Limpeza atual ISO 4406	26/23	23/21	22/19	21/18	20/17	19/16	19/16	19/16	18/15	18/15	18/15
	25/22	23/19	21/18	20/17	19/16	19/15	18/15	18/14	17/14	17/14	17/14
	24/21	21/18	20/17	19/16	19/15	18/14	17/14	17/13	16/13	16/13	16/13
	23/20	20/17	19/16	18/15	17/14	17/13	16/13	16/12	15/12	15/12	15/11
	22/19	19/16	18/15	17/14	16/13	16/12	15/12	14/11	14/11	14/11	14/10
	21/18	18/15	17/14	16/13	15/12	16/12	15/12	14/11	14/11	14/11	14/10
	20/17	17/14	16/13	15/12	14/11	13/11	13/10	13/9	13/10	13/10	13/10
	19/16	16/13	15/12	14/11	13/10	13/9	12/9	12/8	11/8	11/8	11/8
	18/15	15/12	14/11	13/10	12/9	12/8	11/8	-	-	-	-
	17/14	14/11	13/10	12/9	12/8	11/8	-	-	-	-	-
	16/13	13/10	12/9	11/8	-	-	-	-	-	-	-
	15/12	12/9	11/8	-	-	-	-	-	-	-	-
	14/11	11/8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	13/10	11/8 ⁽¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	12/9	11/8 ⁽²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fig 1.12 – Fator de expectativa de vida para sistemas hidráulicos

É geralmente aceito que quanto mais limpo o sistema hidráulico, mais confiável ele é. O quadro acima mostra o efeito da limpeza na vida do sistema hidráulico. Por exemplo, se um sistema hidráulico está atualmente rodando com uma limpeza ISO 19/16, é de se esperar que a vida do sistema possa ser dobrada se a limpeza for melhorada para ISO 16/13.

O objetivo da filtragem é reduzir o nível de contaminantes presentes em um sistema hidráulico e manter um nível aceitável de limpeza independentemente de contaminante ingressando e sendo gerados dentro do sistema. Mantendo este equilíbrio os seguintes benefícios são atingidos:

- Vida do componente é ampliada;
- O desgaste nos componentes é reduzido e desta maneira a vida útil do sistema é ampliada;
- Aumenta a confiabilidade do sistema;

O controle da contaminação minimiza as falhas intermitentes causadas pelo bloqueio dos componentes críticos pelas partículas.

- Reduz o custo das horas paradas e o custo de manutenção;

O custo de reposição de componentes é freqüentemente sobrepujado pelo tempo de produção perdido e custos de manutenção. Aumentando a vida útil dos componentes e a confiabilidade, o controle da contaminação contribui para a eficiência na produção e reduz custos de manutenção.

- Segurança da operação;

A segurança da operação resulta de um desempenho consistente e previsível. O controle da contaminação garante que as condições que levam a uma operação não consistente e não previsível serão grandemente reduzidas.

- Aumenta a vida do fluido;

Diminuindo o número de partículas no sistema, o controle da contaminação pode estender a vida e manter as propriedades originais do fluido, reduzindo a oxidação causada pela presença de partículas reagentes. Devido aos aumentos dos custos dos fluidos e custos ambientais do descarte dos fluidos.

1.6 Eficiência do filtro

A indústria de filtros usa procedimentos de teste de múltipla passagem (Multi – pass) da ISO 16889 para avaliar o desempenho do elemento filtrante. Durante o teste de múltipla passagem o fluido circula através sob condições controladas e monitoradas com precisão. A pressão diferencial através do elemento testado é continuamente registrada enquanto uma quantidade constante de contaminante é injetada no fluxo antes do elemento. Sensores de partículas a laser on – line determinam os níveis de contaminação do fluxo antes e depois do elemento em teste. Um atributo de performance (a razão Beta – β_x) é determinada por diversos tamanho de partículas.

Razão β

Critério mais importante para classificar um elemento filtrante.

$$\beta_x = n_{\text{antes}} / n_{\text{depois}}$$

X: tamanho da partícula

Teste de múltipla passagem ISO 16889 (Antiga ISO 4572)

n antes: Número de partículas antes do fluxo em relação ao elemento igual a ou maior do que x.

n depois: Número de partículas depois do fluxo em relação ao elemento igual a ou maior do que x.

$$n_{\text{antes}} = 10000$$

$$n_{\text{depois}} = 43$$

$$\beta_{10} = 10000_{\text{antes}} / 43_{\text{depois}}$$

$$\beta_{10} = 232$$

Eficiência E

$$E = (\beta_x - 1) / \beta_x \times 100\%$$

$$E = (232 - 1) / 232 \times 100\%$$

$$E = 99,57\%$$

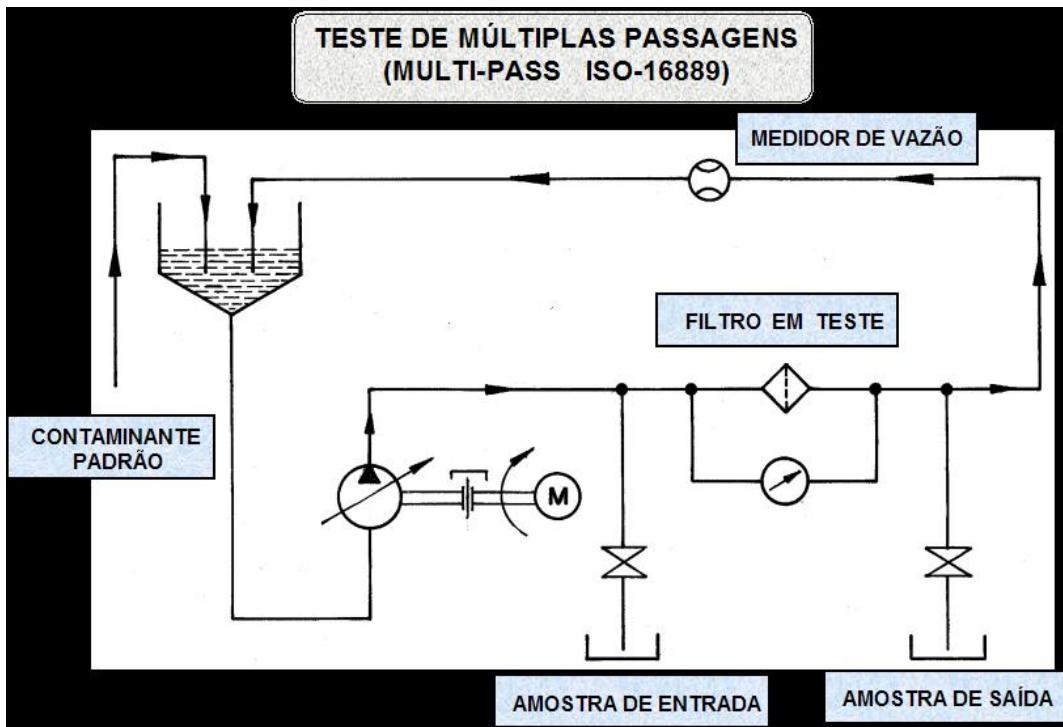


Fig 1.13 – Esquema de teste de múltiplas passagens

TESTE ISO-16889

Partícula (μm)	Quantidade de Partículas por Mililitro de Fluido		Razão Beta (β_x)
	Entrada	Saída	
2	15200	1267	$\beta_2 = 12$
5	8000	80	$\beta_5 = 100$
10	3000	1	$\beta_{10} = 3000$

Fig 1.14 – Tabela ilustrativa de um teste ISO 16889

RAZÃO BETA	EFICIÊNCIA %
1	ZERO
2	50
10	90
20	95
50	98
75	98,66
100	99
200	99,5
500	99,8
1000	99,9

Fig 1.15 – Tabela ilustrativa da Razão Beta X Eficiência

1.7 Medições de limpeza do fluido

Verificações regulares das condições do fluido vão ajudar a garantir que o sistema está trabalhando satisfatoriamente, e que o nível de limpeza especificado esta sendo mantido. Isto pode ser obtido conectando um contador de partículas on – line ou retirando uma amostra do fluido do sistema e analisando em um laboratório.

Para se estabelecer as condições do fluido é necessário extrair uma amostra representativa do fluido do sistema. Quando monitorado regularmente, as amostras devem ser tomadas do mesmo ponto de amostragem, e aproximadamente após o mesmo tempo de operação, o que não deve ocorrer na primeira hora após o inicio das operações.

Contadores de partículas portáteis oferecem uma forma rápida e conveniente de medir o nível de limpeza dos fluidos. Estes contadores de partículas são comparáveis a unidades laboratoriais completas. Estas unidades trazem ao sistema hidráulico a precisão e a repetibilidade de um contador de partículas de laboratório. Esses contadores apenas fornecem a contagem de partículas e as classes de limpeza. Para avaliar conteúdo de água e análise espectrométrica uma análise laboratorial completa é necessária.

Uma análise laboratorial completa deve incluir as seguintes informações:

- Viscosidade do fluido a 40°C e 100°C para checar o índice de viscosidade;

- Acidez – Número Total Ácido (TAN), mede o grau de degradação de um fluido associado ao desenvolvimento de produtos ácidos.
- Análise espectrométrica dos resíduos de metais e aditivos do fluido;
- Gráficos de tendência;
- Conteúdo de água;

1.8 Conclusão

Um programa de monitoramento do fluido é essencial para medir o nível de limpeza atual e avaliar os filtros utilizados em um sistema hidráulico. Nos sofisticados sistemas hidráulicos atuais, tanto o contador de partículas on-line quanto as análises laboratoriais são necessárias para obter um quadro completo das condições do fluido hidráulico. Análise regular do fluido vai garantir que os níveis objetivos de limpeza sejam atingidos e mantidos através da vida útil do sistema hidráulico.

2 FILTRO BY-PASS RMF UTILIZADO NA HAVESTER

2.1 Introdução

O filtro by-pass RMF foi projetado especialmente para aplicações moveis em sistemas hidráulicos ou de transmissão. O óleo é succionado do sistema central através de uma válvula de descarga integrada e especialmente projetada. É insignificante o volume de óleo succionado em qualquer momento, o que garante que não afetará negativamente a operação do sistema central. Ele tem a capacidade de remover até a menor partícula de sujeira do óleo.

2.2 Dimensões e dados técnicos

Vazão nominal: 2,1 l/min

Máxima pressão diferencial: 6.2 BAR;

Máxima temperatura de Fluido: 80ºC;

Máxima pressão na carcaça: 20 BAR;

Faixa de viscosidade: 20 – 160 cSt;

Conexão de pressão: $\frac{1}{4}$ BSP;

Conexão de retorno: $\frac{1}{2}$ BSP;

Diâmetros das mangueiras: $\frac{1}{2}$ ``;

Peso: 6 Kg;

Dimensões (AxLxC) 418 x 131 x 159 mm);

Conexão para contador de partículas: LASPAC 1 (M16 x 2);

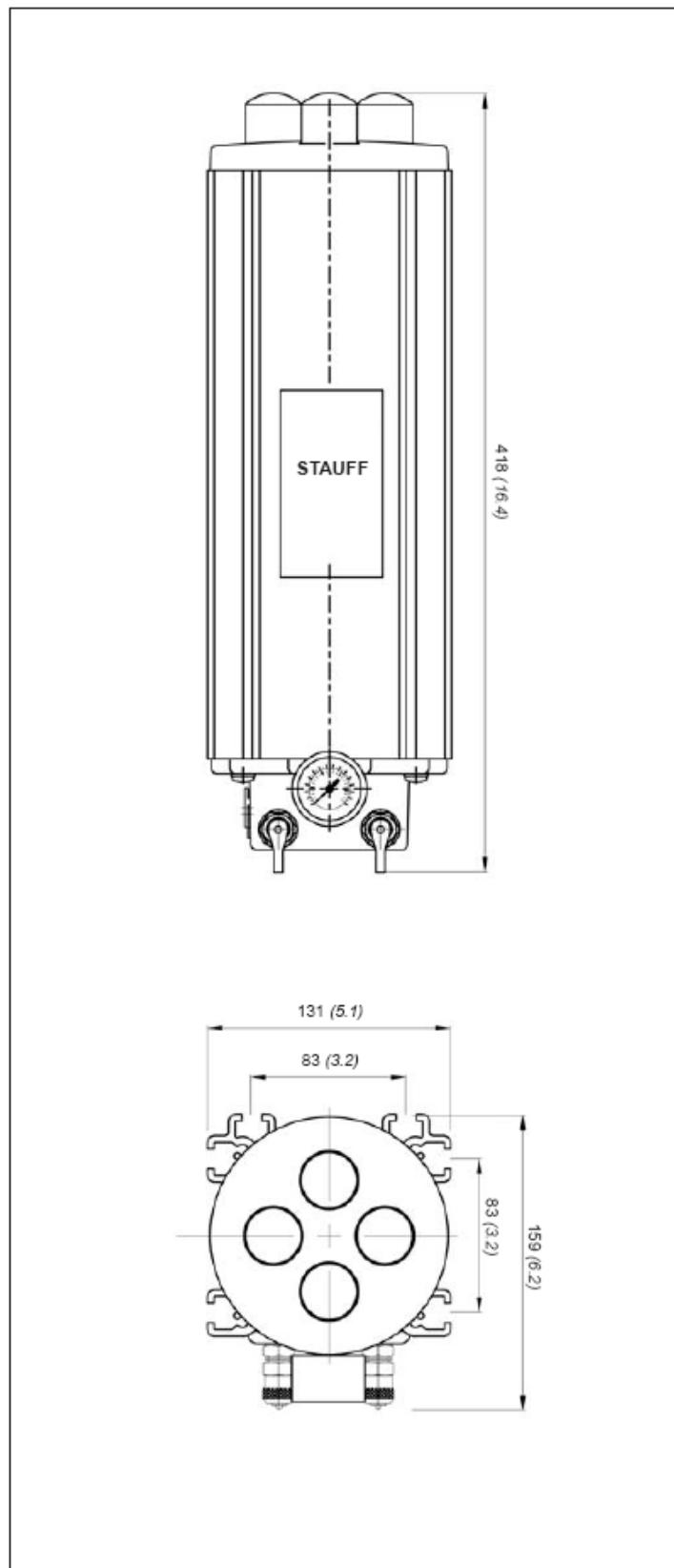
Faixa de pressão: 12 – 429 BAR.



Fig 2.1 – Filtro by-pass RMF



Fig. 2.2 – Filtro by-pass RMF instalado na Komatsu 02



Todas as dimensões em mm (polegada)

Fig 2.3 – Dimensões do Filtro RMF

2.3 Elemento Micro Filtrante

Os sistemas de micro filtragem radial diferenciam-se dos outros pelos seus elementos filtrantes de alta eficácia, capazes de filtrar partículas de até 0,5 micrômetro.

O sucesso do sistema de filtragem by-pass RMF vem do desenho do elemento e da carcaça. O elemento é feito com um meio de celulose de 0,5 micrômetro aplicado através de um método especial de envelopamento que gera várias centenas de camadas de meio filtrante. As fibras de celulose também absorvem e retêm a água, o que permite reduzir a velocidade do processo de oxidação do fluido. A construção da carcaça só permite a circulação radial através do elemento filtrante, o que previne a formação de canais e o consequente curto-circuito do fluido. O desenho do by-pass mantém constante a vazão e a pressão no filtro, proibindo qualquer descarga de partículas.

Essas características fazem com que o sistema de filtragem RMF mantenha um rendimento nominal de filtragem de Beta $2 > 2330$. Com isso, o usuário mantém níveis de limpeza do fluido que não podem ser alcançados através dos métodos convencionais de filtragem de vazão total.

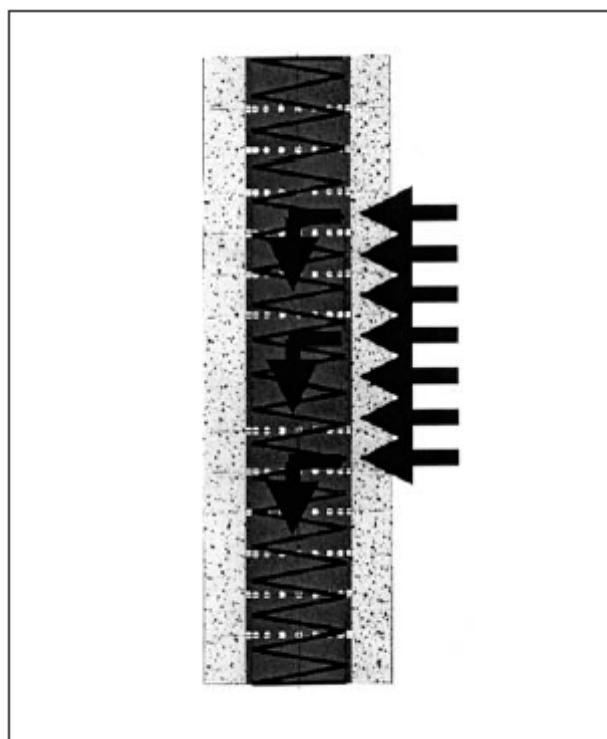


Fig 2.4 – Desenho do elemento filtrante



Fig 2.5 – Elemento filtrante do filtro RMF

Resumindo as características de um sistema RMF os filtros de óleo proporcionam, uma acuidade de 0,5 micrômetro ($\beta_{0.5}=200$, $\beta_2=2330$), uma grande capacidade de retenção de partículas, uma elevada capacidade de filtragem graças ao efeito profundidade e uma elevada capacidade de adsorção d'água.

2.4 Vantagens do sistema by-pass RMF

As vantagens dos sistemas RMF geram:

Menos falhas: As tolerâncias entre as partes móveis nas servo-válvulas e nas válvulas proporcionais estão constantemente reduzidas. O resultado é que até as menores quantidades de iodo podem danificar o sistema. Os filtros RMF removem esse iodo.

Proteção de dispendiosos sistemas centrais: Os filtros do sistema RMF são aplicados em configurações by-pass e limpam permanentemente o óleo do reservatório. O óleo que chega até o filtro central fica, portanto, mais limpo e permite um uso mais longo desse dispendioso filtro. Assim, o filtro central atua primeiramente como filtro de emergência.

Menor freqüência das trocas de óleo: Legislações ambientais cada vez mais rigorosas no campo das trocas de óleo, do armazenamento do óleo e da eliminação de óleos usados geram aumentos nos custos. Os filtros RMF aumentam a vida útil dos fluidos e, consequentemente, reduzem seus custos.

Maior vida útil do fluido: Freqüentes trocas de óleo costumam ser o resultado da deterioração química do óleo causada pelo processo de oxidação do óleo. Esse processo é desencadeado pela presença de iodo. Se água estiver presente também, isso atua como catalisador e o processo de oxidação fica acelerado. Com o sistema do RMF conseguimos remover o iodo e a água do óleo.

Menos horas de maquina parada: A redução das falhas causadas por componentes desgastados e uma menor freqüência das trocas de óleo significam um aumento no tempo de produção.

2.5 Conclusões

Neste capítulo foram introduzidas algumas definições referentes ao modelo de filtro by-pass utilizado na máquina Harvester. Além disso, caracterizamos as vantagens e benefícios desse sistema de filtragem. No capítulo seguinte será explicado o modelo utilizado na Harvester da Aracruz Celulose.

3 TESTE DO SISTEMA DE FILTRAGEM DA HARVESTER

3.1 Introdução

No capítulo anterior, foi feita uma abordagem sobre o sistema de filtragem by-pass RMF juntamente com as características e benefícios do filtro e do elemento filtrante utilizado na Harvester. Neste capítulo, apresentaremos os resultados conseguidos com o sistema de micro filtragem radial na máquina florestal colheitadeira de eucalipto.

3.2 Definições

A implantação do controle de contaminação na Harvester Komatsu 02 e Volvo 14 da Aracruz Celulose foram avaliados considerados 3 pontos principais.

- 1) Estabelecer os níveis alvo de limpeza do fluido para cada máquina;
- 2) Selecionar e instalar o equipamento de filtragem;
- 3) Monitorar a limpeza do fluido em intervalos regulares para assegurar que os objetivos sejam atingidos. Ajustar as técnicas de filtragem e eliminação de contaminante, conforme requerido, para estabilizar os objetivos de limpeza.

Máquina Harvester Komatsu 02

Modelo: PC-200

Reservatório: 320 litros

Pressão máxima de operação: 320 BAR;

Fluido do sistema hidráulico: Lubrax Top Turbo15W/40

Temperatura de operação: 80°C

- 1) Nível alvo de limpeza: NAS 6 – ISO 17/15/12
- 2) Filtro By-Pass para aplicações móveis do fabricante STAUFF com:
Carcaça simples para reservatório de até 750 litros, com Elemento filtrante de fibra de celulose com micragem de $0,5\mu\text{m}$ e $\beta_{0,5} \geq 200$ ($\beta_2 \geq 2331$) higroscópico (absorve água do fluido hidráulico, sistema de blindagem do elemento filtrante por sistemas de placas (nas extremidades), com sistema duplo de retirada de amostras (tomadores de pressão). Referência: BSP – 1A – 30 – H – B – 0 – 0 – 0 .
- 3) Monitoramento semanal através do contador de partículas on-line (LASPAC1 - STAUFF) durante o período de 3 meses.

Máquina Harvester Volvo 14

Modelo: EC210-F A/B

Reservatório: 170 litros

Pressão máxima de operação: 180 BAR

Fluido do sistema hidráulico:Lubrax Ind .HR 68 EP

Temperatura de operação: 80°C

1) Nível alvo de limpeza: NAS 6 – ISO 17/15/12

2) Filtro By-Pass para aplicações móveis do fabricante STAUFF com:
Carcaça simples para reservatório de até 750 litros, com elemento filtrante de fibra de celulose com micragem de $0,5\mu\text{m}$ e $\beta_{0,5} \geq 200$ ($\beta_2 \geq 2331$) higroscópico (absorve água do fluido hidráulico, sistema de blindagem do elemento filtrante por sistemas de placas (nas extremidades), com sistema duplo de retirada de amostras (tomadores de pressão). Referência: BSP – 1A – 30 – H – B – 0 – 0 – 0 .

3) Monitoramento semanal através do contador de partículas on-line (LASPAC1 - STAUFF) durante o período de 3 meses.

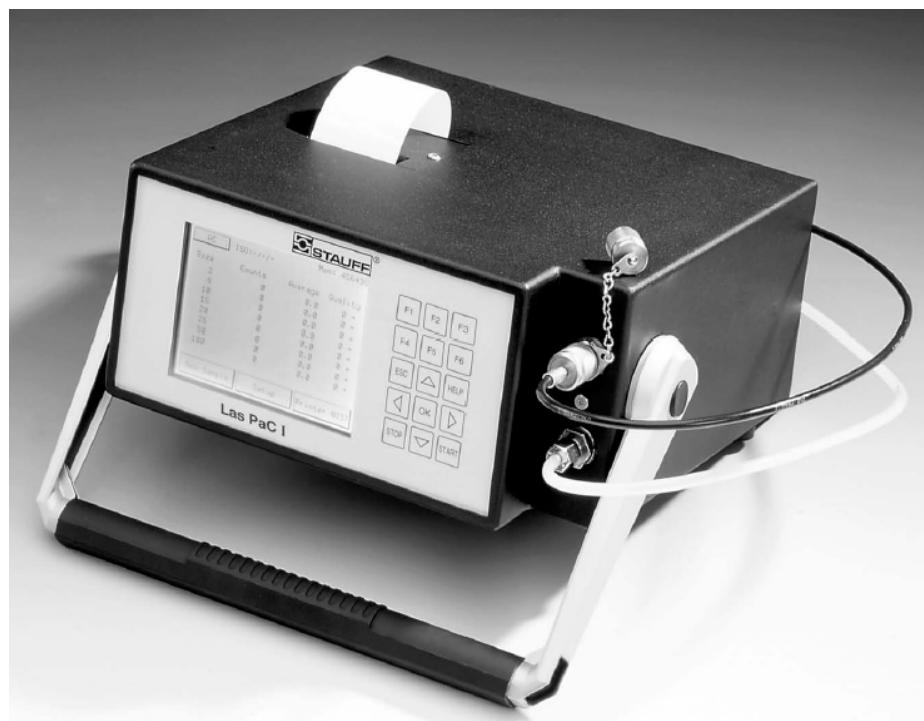


Fig 3.1 – LASPAC I (Contador de partículas a laser)



Fig 3.2 – Filtro By-Pass RMF Komatsu 02



Fig 3.3 - Harvester Komatsu 02

As máquinas harvesters possuem um controle eletrônico de muita precisão com um banco de válvulas proporcionais, cilindros e sensores no Cabeçote 370E Valmet. A máquina faz a contagem de todas as árvores cortadas, medição de espessura e mede o comprimento do eucalipto no momento que realiza o descasque e o corte do mesmo. Esses dados são enviados para um módulo da Aracruz no campo e posteriormente segue via satélite para o centro de controle da Aracruz. A Harvester processa em torno de 3 eucaliptos por minuto em uma jornada de 24 horas, exceto quando ocorre uma parada imprevista ou uma manutenção programada. A expectativa de vida do cabeçote 370 E Valmet estão em torno de 20000 horas.



Fig 3.4 – Cabine de controle do processador Harvester Komatsu 02

Com a instalação do sistema de filtragem by-pass RMF espera-se conseguir o aumento de 2000 a 5000 horas na expectativa de vida do cabeçote 370E (processador), a parte mais importante para a colheita do eucalipto avaliado em torno de 600 mil reais.

3.3 Resultados

O processo de monitoramento de contaminantes foi realizado no campo de operação da Harvester através de um contador de partículas on-line Fig [3.1], ele consiste de um sensor acoplado a um computador de mão por um cabo. Durante o teste, o sensor é colocado momentaneamente em funcionamento e uma pequena amostra do fluido sob pressão passa pelo sensor e depois de um ou dois minutos a contagem das partículas é exibida na tela do computador de acordo com os níveis de limpeza nas normas NAS 1638 e ISO 4406. A tabela abaixo mostra os resultados obtidos no período de análise do sistema de filtragem absoluta na Harvester.

Machine	Sample description	Date Sample Draw	Machine time	LASPAC					Notes:
				ISO	>2	>5	>15	NAS	
Komatsu Harvester 2	1st Hydraulic Sample	março 9, 2005	4548	21/15/9	103695,9	1772,0	29,5	7	BPS was installed
Komatsu Harvester 2	2nd Hydraulic Sample	março 21, 2005	4753	16/10/5	3991,7	64,0	3,0	2	No maintenance
Komatsu Harvester 2	3rd Hydraulic Sample	março 28, 2005	4837	17/10/6	10432,6	85,5	3,8	2	Tank filling
Komatsu Harvester 2	4th Hydraulic Sample	abril 4, 2005	4931	16/10/7	6362,4	69,5	9	3	Harvester head's maintenance
Komatsu Harvester 2	5th Hydraulic Sample	abril 11, 2005	5038	18/11/6	21245,1	190,2	4,2	6	Hoses maintenance and tank filling
Komatsu Harvester 2	6th Hydraulic Sample	abril 18, 2005	5147	17/10/6	8437,2	80,3	3,7	2	No maintenance
Komatsu Harvester 2	7th Hydraulic Sample		5227						Service to fix leakage in the harvester head
Komatsu Harvester 2	8th Hydraulic Sample	maio 5, 2005	5438	17/10/5	11399,0	59,1	2,8	2	No maintenance
Komatsu Harvester 2	9th Hydraulic Sample	maio 12, 2005	5555	18/13/7	24178,7	620,9	12,6	5	Tank filling
Komatsu Harvester 2	10th Hydraulic Sample	maio 19, 2005	5663	19/14/7	48983,1	1226,2	10,6	6	Tank filling
Komatsu Harvester 2	11th Hydraulic Sample	maio 25, 2005	5747	19/13/7	44450,0	601,5	6,5	5	Hoses maintenance
Volvo Hasvester 14	1st Hydraulic Sample	março 23, 2005	15281	22/21/16	322252,2	102236,5	4928,9	12	BPS was installed
Volvo Hasvester 14	2nd Hydraulic Sample	março 28, 2005	15296	17/17/16	10786,8	7900,4	3665,7	12	Service in the base machine
Volvo Hasvester 14	3rd Hydraulic Sample	abril 4, 2005	15382	17/17/15	9297,7	6561,8	2768,7	11	Service to fix leakage in the base machine
Volvo Hasvester 14	4th Hydraulic Sample	abril 11, 2005	15487	17/16/16	9096,3	6349,8	3223,0	11	No maintenance
Volvo Hasvester 14	5th Hydraulic Sample	abril 18, 2005	15586	17/12/8	8359,0	204,9	13,8	6	No maintenance
Volvo Hasvester 14	6th Hydraulic Sample	abril 25, 2005	15684						Change the cylinder in the harvester head
Volvo Hasvester 14	7th Hydraulic Sample	maio 5, 2005	15799	16/14/9	5972,4	1255,3	30,4	6	Change 2 hoses in the harvester head
Volvo Hasvester 14	8th Hydraulic Sample	maio 12, 2005	15876	18/15/7	22723,3	2230,6	8,5	7	No maintenance
Volvo Hasvester 14	9th Hydraulic Sample	maio 19, 2005	15979	18/13/5	13463,4	484,4	3,2	5	No maintenance
Volvo Hasvester 14	10th Hydraulic Sample	maio 25, 2005	16070	17/15/5	10473,8	1719,5	3,0	7	Hoses maintenance and tank filling

Fig 3.5 – Tabela de Monitoramento da contaminação nas Harvesters

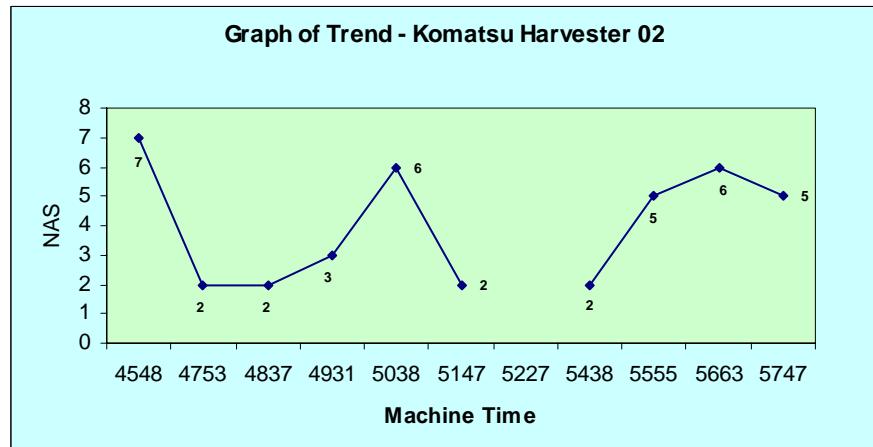


Fig 3.6 – Gráfico de Tendência da Komatsu 02

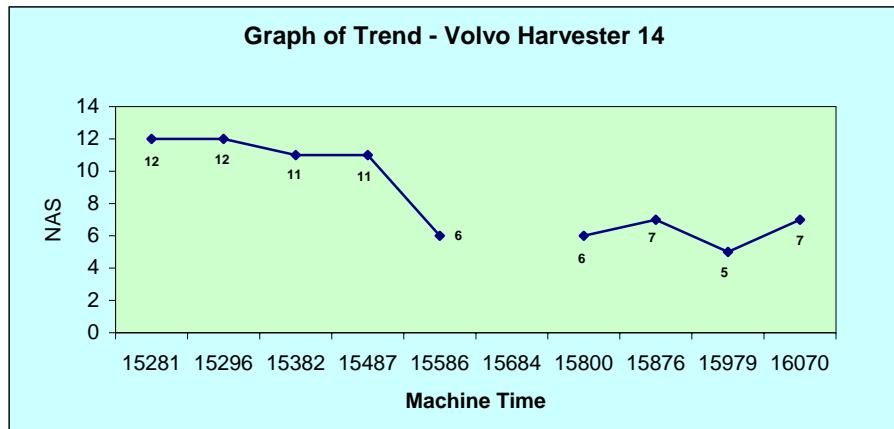


Fig 3.7. – Gráfico de Tendência do Volvo 14

Observando a figura [3.5] percebemos que a máquina Harvester Komatsu 02 reduziu drasticamente o nível de contaminação do seu sistema conseguindo um padrão além do esperado e um tempo de resposta excelente em relação à contaminação que é ingressada e gerada no sistema. Tomando por base o tempo da máquina no dia da instalação de 4548 horas e na segunda análise 4753 horas a máquina operou praticamente 18 horas por dia operando sem paradas de manutenção somente parando no almoço e troca de turno do operador e o resultado foi uma redução elevada nos particulados de 2, 5 e 15 μm . Notamos que quando a operação da máquina não é interferida, os resultados são obtidos com sucesso. E mesmo com alguma interferência na máquina por alguma manutenção ou preenchimento do reservatório o filtro tem um

tempo de resposta eficaz e mantém o nível de contaminação nos padrões requeridos pela Aracruz.

A máquina Volvo 14 é mais crítica, pois ela possui uma rodagem bem maior que a Komatsu 02, seus componentes estão bem mais desgastados e o nível de contaminação muito mais elevado Fig [3.5]. Percebemos também como a Norma ISO 4406 dimensiona de uma forma mais coerente o nível de contaminação que a norma NAS 1638. Na instalação do filtro, medimos um nível de contaminação ISO 22/21/16 e mantendo o NAS12. Na segunda análise percebemos uma redução considerável no nível de contaminação das partículas de 2, 5, 15 μm para ISO 17/17/16 e mantendo ainda o NAS 12 . Todavia, chegamos ao padrão requisitado pela Aracruz monitorando o sistema hidráulico e as horas de operação da máquina, mesmo com intervenção na mesma. O classe obtida de NAS 5 na Volvo 14 deve-se ao tempo máximo da máquina ficar operando sem a intervenção de manutenção na máquina, fazendo com que o filtro trabalhasse e reduzisse aos padrões aceitáveis pela Aracruz. O padrão foi mantido nos níveis requeridos para essa máquina crítica devido ao tempo de resposta da micro filtragem radial com o sistema by-pass.

3.4 Conclusão

Inegavelmente, o monitoramento da contaminação com a utilização do sistema de filtragem absoluta by-pass RMF (micro filtragem radial) possui um desempenho rápido e eficaz conseguindo reduzir o nível de contaminação para os padrões requeridos pela Aracruz. Notamos que mesmo com intervenção de manutenção no sistema das maquinas os níveis de limpeza no fluido foram mantidos.

4 CONCLUSÕES

Foi visto nos capítulos anteriores que o controle de contaminantes através da micro filtragem radial pode juntamente com o monitoramento da condição de operação do sistema utilizado proporciona uma redução para os níveis de contaminação requeridos pela Aracruz e até superar os níveis exigidos. A empresa, após a aprovação do sistema, está colocando gradativamente a micro filtragem radial com o filtro by-

pass RMF em todas as suas máquinas colheitadeiras de eucalipto. A empresa espera uma conseguir uma redução de custos com manutenção e maior disponibilidade operacional do equipamento, aumento da vida útil dos componentes (ganho de 2000 a 5000 horas de operação) e ela espera que os intervalos de troca do óleo aumentem pelo menos uma vez. Por exemplo, de acordo com a Pall Corporation “Diz que com a limpeza dos fluidos, os intervalos de troca podem ser aumentados de duas vezes ou mais”. (PAVILAT & CANIL, 2000). O investimento inicial para a instalação do sistema gira em torno de R\$ 5000,00 e a redução de custos e ganhos com a disponibilidade destes equipamentos é dimensionada por uma simples conta. A harvester processa 3 eucaliptos por minuto, o ganho de 2000 horas geraria 120000 minutos de disponibilidade operacional do processador. Esses custos com a instalação são rapidamente absorvidos e geralmente a economia ultrapassa os custos com margens grandes.

Algumas dificuldades foram encontradas no campo, por exemplo, a falta de conhecimento da equipe de manutenção com relação a um controle do nível de contaminação e de possíveis fontes externas que geram o ingresso de contaminantes através da manutenção realizada pelos mesmos. Todavia, o problema foi contornado fazendo um trabalho de conscientização da equipe com treinamentos ministrados pela STAUFF e práticas de manutenção realizadas pela HIDRAUVIT no campo baseada em um programa voltado para controle de contaminação, onde eu pude ensinar os meus conhecimentos técnicos a outras pessoas, proporcionando a evolução do sistema adotado com resultados dentro dos padrões estabelecidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Pavlat e J. Canil **New Contamination Control I Techniques Machine Lubricating and Hydraulic Systems.** Pall Corporation, 2000.
- [2] R.W. Park. **Workshop on Total Contamination Control Centre for Machine Condition Monitoring.** Monash University, Moog Australia, August 1999.
- [3] J. Van. **Stauff Contamination Control Program,** Brazil, 2003.
- [4] J. Luiz. **Contaminação e filtragem.** Consultoria TCT, 1997.
- [5] J.C. Fitch. Disponível em <http://www.sotreq.com.br>. (Acessado no dia 23/05/06).
- [6] B. Técnico 001-93. **Classes de contaminação.** HDA Acessórios e Equipamentos Ltda, Dezembro, 2002.
- [7] W. Stauffenberg. **Filtros Off-Line & By-Pass OLS/BSP,** 2002.
- [8] **Manual de filtragem Hidráulica,** Parker Filtration, 2000.
- [9] Moog. **Hydraulic System Filters, New ISO Fluid and Cleanliness Rating Standard.**
- [10] Hydac. **Catalogue,** Filtration Technology.
- [11] I.M. Hutchings. **Tribology – Friction and Wear of Engineering Materials,** Published by Edward Arnold, London, 1992.