Campus de São Carlos

UMA ABORDAGEM DO PROBLEMA DE
CONTAMINAÇÃO DE SISTEMAS DE
TRANSMISSÃO POR FLUIDOS E O
CONTROLE ATRAVÉS DA TÉCNICA DE
CONTAGEM DE PARTÍCULAS

AMARILDO JOSÉ ZAMPAULO

Profa. Dra. Lauralice C. F. Canale

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

Amarildo José Zampaulo

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP
EXEMPLAR REVISADO
Data de entrada no Serviço...21/12/05
Ass.:..... <i>leson</i>

UMA ABORDAGEM DO PROBLEMA DE CONTAMINAÇÃO DE SISTEMAS
DE TRANSMISSÃO POR FLUIDOS E O CONTROLE ATRAVÉS DA
TÉCNICA DE CONTAGEM DE PARTÍCULAS

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para a obtenção do
Título de Mestre em Fluidos Hidráulicos.

DEDALUS - Acervo - EESC

31100053651

Orientadora: Profa. Dra. Lauralice C. F. Canale

São Carlos
2005

Class.	TESE-EESC
Cutt.	6366
Tombo	T 329105
Sysno	1488981

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

Z26a Zampaulo, Amarildo José
 Uma abordagem do problema de contaminação de
 sistemas de transmissão por fluidos e o controle
 através da técnica de contagem de partículas /
 Amarildo José Zampaulo. -- São Carlos, 2005.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
 São Carlos-Universidade de São Paulo, 2005.
 Área: Engenharia Mecânica.
 Orientador: Prof^a. Dr^a. Luralice C. F. Canale.

1. Partículas. 2. Fluido. 3. Transmissão.
 4. Contaminação. 5. Hidráulico. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **AMARILDO JOSÉ ZAMPAULO**

Dissertação defendida e julgada em 23-09-2005 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Associada **LAURALICE DE CAMPOS FRANCESCHINI CANALE**
(Orientadora)
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) APROVADO

Prof. Dr. **SÉRGIO RODRIGUES FONTES**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) APROVADO

Dr. **JUAN CARLOS HORTA GUTIERREZ**
(Instituto Superior Politecnico Jose A. Etchevarria/Cuba) APROVADO

Prof. Associado **JONAS DE CARVALHO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica

Prof. Titular **MARIA DO CARMO CALHURY**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por ter me proporcionado mais essa oportunidade em minha vida, dando-me saúde, disposição e muita perseverança para enfrentar todos os obstáculos que apareceram em meu caminho durante essa caminhada.

À minha orientadora, Profa. Dra. Luralice C.F. Canale, que me orientou durante todo o processo de elaboração da dissertação.

À minha família, em especial à minha esposa, Cláudia, e a meu filho, Gabriel, que tiveram a paciência e o discernimento para entender as minhas ausências durante essa importante fase em minha vida.

À Universidade de São Paulo, por me oferecer condições e estrutura para desenvolver a minha dissertação de mestrado.

Enfim, agradeço a todos aqueles que incentivaram e contribuíram de alguma forma para que esse momento se tornasse realidade.

RESUMO

ZAMPAULO, A. J. (2004). *Uma abordagem do problema de contaminação de sistemas de transmissão por fluidos e o seu controle através da técnica de contagem de partículas*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

O avanço tecnológico tem proporcionado à indústria em geral desenvolver e fabricar produtos mais sofisticados em todos os campos da ciência. Não distante dessa realidade, a indústria da mobilidade também vem incorporando, através de projetos arrojados, as novas tecnologias em seus produtos, respondendo, assim, às necessidades e expectativas de seus clientes, que exigem produtos com maior produtividade e disponibilidade para trabalho. Essas tecnologias estão relacionadas com os sistemas de transmissão de força por fluidos, através da introdução de válvulas eletro-hidráulicas e também pela redução da tolerância entre partes deslizantes e rotativas desses sistemas. A partir da introdução dessa nova tecnologia, a ênfase desse trabalho foi mostrar a importância do controle de contaminação nas fases do processo de concepção, fabricação e montagem do produto, incluindo a quebra de paradigmas relacionada ao fator humano e, em especial, o controle de contaminação do fluido de transmissão de força utilizando a tecnologia de contagem de partículas. Assim, foi evidenciado que através da determinação de limites aceitáveis de contaminação para cada tipo de sistema de transmissão de força, em função do tipo de tecnologia agregada, é possível reduzir drasticamente as falhas nos sistemas de transmissão de força por fluido durante a operação do produto no campo, mesmo sendo essa contaminação considerada um inimigo invisível.

Palavras-chave: fluido, transmissão, contaminação, partículas, hidráulico

ABSTRACT

ZAMPAULO, A. J. (2004). *Increase the power transmission systems fluids reliability through contamination control by particle counting*. Dissertation – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

The technological advance has proportionated to the industry in general to develop and to manufacture more sophisticated products in all the fields of science. Not distant of this reality, the industry of mobility also comes incorporating through bold projects the new technologies in its products, thus answering to the needs and expectations of its customers, who ask for products with high productivity and availability to work. These technologies are related with the power transmission systems by fluids through the introduction of electrohydraulic valves, and also by the reduction of tolerance between smooth and rotary parts of the system. From the introduction of this new technology, the emphases of this dissertation was show the importance of the contamination control in the process phases of conception, manufacturing and assembly of the product, including brake the paradigm related with human factors, and specially the fluid contamination control of the power transmission using the particle counting technology. To show that through the determination of acceptable limits of contamination for each type of power transmission system, as a function of the type of added technology, it is possible to drastically reduce the failures in the power transmission systems by fluids during the operation of the product in the field, even being this contamination considered an invisible enemy.

Keywords: fluid, transmission, contamination, particle, hydraulic

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- Visualização do tamanho de partículas	19
FIGURA 2 - Construção típica de um reservatório hidráulico	23
FIGURA 3 - Equipamentos usados para análise gravimétrica	32
FIGURA 4 - Ferrograma Típico	34
FIGURA 5 - Princípio de funcionamento de um contador de partículas	42
FIGURA 6 - Desgaste em rolamento provocado por contaminação	44
FIGURA 7 - Curvas de distribuição de contaminantes e diagrama esquemático para um sistema de duas máquinas	47
FIGURA 8 - Curva de distribuição de contaminantes e diagrama esquemático para dois sistemas de uma máquina	49
FIGURA 9 - Depressão produzida por ataque de partículas	55
FIGURA 10 - Desempenho de válvula hidráulica reduzida por contaminação	58
FIGURA 11 - Diminuição da força do carretel por esmagamento	59
FIGURA 12 - Diminuição da força do carretel por entupimento	60
FIGURA 13 - Desgaste por erosão	61
FIGURA 14 - Desgaste por adesão	62
FIGURA 15 - Desgaste por fadiga	63
FIGURA 16 - Abrasão por partículas do mesmo tamanho da folga	65
FIGURA 17 - Relação entre o volume de abrasivo de desgaste e a taxa logarítmica da dureza do abrasivo para o metal	66
FIGURA 18 - Contaminação em válvula hidráulica ocasionando falha	71
FIGURA 19 - Integração dos processos envolvidos no controle de contaminação	73
FIGURA 20 - Especificação de limpeza para componentes	77
FIGURA 21 - Comparação entre contagem visual e contagem com contador automático de partículas – Influência do aditivo na contagem	81
FIGURA 22 - Sistema de transporte com filtragem incorporada	85
FIGURA 23 - Sistema de filtragem para descarregamento do fluido	87
FIGURA 24 - Filtragem de fluido no sistema de abastecimento	89

FIGURA 25 - Contaminação em frascos de coleta de amostra	93
FIGURA 26 - Preparação e contagem de partículas em laboratório	95
FIGURA 27 - Contagem de partículas direto no produto	96
FIGURA 28 - Ambiente de montagem de conjuntos hidráulicos	100
FIGURA 29 - Dispositivo de secagem de tubos hidráulicos	100
FIGURA 30 - Montagem do reservatório de fluido - processo antigo	101
FIGURA 31 - Análise gravimétrica de contaminação ambiente - processo antigo	102
FIGURA 32 - Sala de montagem de reservatório de fluido - processo modificado	103
FIGURA 33 - Análise gravimétrica de contaminação ambiente- processo melhorado	103
FIGURA 34 - Embalagem de pequenos componentes	105
FIGURA 35 - Embalagem e armazenagem de cilindros hidráulicos	106
FIGURA 36 - Monitoramento do fluido novo recebido do fornecedor	107
FIGURA 37 - Período de troca de elemento de filtro x custo de troca	108
FIGURA 38 - Nível de limpeza de reservatórios hidráulicos	109
FIGURA 39 - Resultado de auditoria de processo	110
FIGURA 40 - Nível de limpeza do fluido por contagem de partículas para embarque do produto	110
FIGURA 41 - Evitação de garantia do produto por problemas de contaminação	111

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Código do Nível de Contaminação	38
TABELA 2 - Classe de limpeza NAS4059	40
TABELA 3 - Impacto do teste de poeira sobre a capacidade de Retenção e taxa beta dos filtros	51
TABELA 4 - Convertendo tamanho de partículas ACFTD para tamanho de partículas Nist	52
TABELA 5 - Eficiência de filtração de elementos de filtros	53
TABELA 6 - Desgaste de componentes de sistemas hidráulicos	67
TABELA 7 - Folga típica de componentes hidráulicos	68
TABELA 8 - Recomendação de limpeza de fluido de sistemas hidráulicos	69
TABELA 9 - Incremento de contaminação após uso do reservatório	82
TABELA 10 - Incremento de contaminação após o envazamento do fluido	83
TABELA 11 - Incremento de contaminação durante o transporte do Fluido	84
TABELA 12 - Processo de transporte do fluido com filtragem incorporada	86
TABELA 13 - Limpeza do fluido no processo de descarregamento e armazenagem do fluido	87
TABELA 14 - Limpeza do fluido no processo de enchimento do Produto	89
TABELA 15 - Resultado da contagem- Frasco original versus esterilizado	93
TABELA 16 - Resultado da contagem- Amostra com remoção e sem remoção de ar - Laboratório	94
TABELA 17 - Comparação de viscosidade do fluido	96
TABELA 18 - Resultado da contagem- Amostra com remoção e sem remoção de ar- Amostra do produto	97

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

INTRODUÇÃO.....	12
Importância do Tema.....	13
Objetivo.....	14
Metodologia.....	15
Síntese dos capítulos deste trabalho.....	15
 1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	 17
1.1 Importância dos fluidos nos sistemas hidráulicos.....	17
1.2 Introdução à contaminação em sistemas de fluidos.....	18
1.3 Projetando sistemas de transmissão de potência por fluidos com controle de contaminação.....	20
1.3.1 Controle por exclusão da contaminação.....	22
1.3.1.1 Contaminantes incorporados como resultado natural do processo de fabricação de componentes.....	25
1.3.1.2 Contaminantes incorporados durante o teste de desempenho dos conjuntos hidráulicos.....	26
1.3.1.3 Contaminantes incorporados ao sistema durante o processo de montagem.....	27
1.3.1.4 Contaminantes arrastados para dentro do sistema através do sistema de vedação.....	27
1.3.1.5 Contaminantes introduzidos durante a manutenção do sistema hidráulico.....	28

1.3.1.6. Contaminantes incorporados ao fluido novo.....	29
1.4 Controle por detecção da contaminação.....	30
1.4.1 Principais tipos de análise de contaminação nos fluidos.....	30
1.4.2 Teste gravimétrico.....	31
1.4.3 Ferrografia.....	32
1.4.3.1 Ferrografia Analítica (NA).....	33
1.4.3.2 Ferrografia Quantitativa (DR).....	34
1.4.4 Espectrometria.....	35
1.4.5 Contagem de partículas.....	36
1.4.5.1 Determinação de quantidade de partículas por contagem óptica.....	41
1.4.5.2 Determinação de quantidade de partículas através de contadores automáticos de partículas.....	42
1.5 Remoção de contaminantes.....	44
1.6 Contaminantes gerados pelo desgaste interno de componentes.....	53
1.7 Contaminantes incorporados devido à degradação do fluido dentro do sistema hidráulico.....	54
1.8 Efeitos da contaminação em sistemas hidráulicos.....	55
1.8.1 Falhas prematuras.....	56
1.8.1.1 Esmagamento de partículas.....	57
1.8.1.2 Obstrução do orifício de passagem do fluido.....	58
1.8.2 Falhas de longo prazo.....	60
1.8.2.1 Desgaste por erosão.....	60
1.8.2.2 Desgaste por adesão.....	61
1.8.2.3 Desgaste por fadiga superficial.....	63
1.8.2.4 Desgaste por abrasão.....	63
1.9 Desgaste característico dos componentes hidráulicos.....	66
1.10 Principais componentes de um sistema hidráulico e suas folgas características.....	67
2. ESTUDO DE CASO.....	70
2.1 Implantação do controle de contaminação.....	74
2.1.1 Especificação de limpeza para o fluido do produto.....	75

2.1.2 Especificação de limpeza para componentes e conjuntos.....	76
2.1.3 Nível de limpeza do fluido de primeiro enchimento.....	77
2.1.3.1 Formulação e homogeneização do fluido.....	79
2.1.3.2 Envazamento do fluido no fornecedor.....	82
2.1.3.3 Transporte do fluido.....	83
2.1.3.4 Descarregamento e estocagem do fluido em tanques.....	86
2.1.3.5 Enchimento dos fluidos nos produtos.....	88
2.1.4 Treinamento e conscientização do homem.....	90
2.1.5 Medição e controle de contaminação em componentes, conjuntos e produtos.....	91
2.1.5.1 Medição e controle de contaminação dos fluidos de primeiro enchimento e do produto final.....	92
2.1.5.2 Medição de contaminação de componentes através de análise gravimétrica.....	98
2.1.6 Melhoria de processos de fabricação e montagem dos componentes e produtos.....	99
2.1.7 Recebimento, estocagem e movimentação de componentes de sistemas hidráulicos.....	104
2.2 Resultados.....	106
3 CONCLUSÃO.....	112
3.1 Trabalhos futuros	113
3.1.1 Estudo da contaminação gerada por atrito.....	113
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	114

INTRODUÇÃO

A introdução de válvulas eletro-hidráulica, servo-válvulas e válvulas proporcionais nos circuitos dos sistemas de transmissão de força por fluidos tem possibilitado aos fabricantes de equipamentos aumentar a pressão dos sistemas e, conseqüentemente, a força de operação, como também oferecer produtos com maior sensibilidade e precisão nas operações, através de ajustes mais apertados entre os componentes metálicos de seus conjuntos de geração, distribuição de pressão e de transmissão de força.

A versatilidade e facilidade de operação dos equipamentos em geral também podem ser atribuídas à introdução dessa nova tecnologia. Essas melhorias significativas trazem consigo a necessidade de projetar, fabricar, montar e manter os sistemas de fluidos limpos durante a sua aplicação no campo, visando atender às expectativas dos clientes quanto à confiabilidade e disponibilidade do produto para operação. O nível de limpeza desses sistemas pode ser determinado por diversos processos e entre eles o controle de contaminação por contagem de partículas.

O fluido contaminado em um sistema hidráulico poderá acarretar ao sistema uma série de problemas, em especial aos componentes que transmitem movimentos rotativos e deslizantes axiais e radiais. A falha de um componente é definida como a perda do seu desempenho mínimo aceitável, e é iniciada geralmente na forma de um desgaste suave que causa mudanças dimensionais lentas no componente. A operação contínua desse sistema leva a um desalinhamento, que por sua vez induzirá a um desgaste mais severo e, conseqüentemente, a ocorrência da falha.

O controle da contaminação dos fluidos por contagem de partículas vem sendo uma das técnicas mais utilizadas pelas empresas que desenvolvem e aplicam sistemas de transmissão de força por fluidos em seus produtos para monitoramento do nível de limpeza dos fluidos, pela facilidade de execução da análise, rapidez na resposta dos resultados e, principalmente, pela confiabilidade dos resultados. Com isso é possível proporcionar aos equipamentos, um aumento de vida útil dos componentes desses sistemas, minimizando a incidência de falhas prematuras, ou até mesmo falhas

catastróficas, garantindo máxima produtividade e disponibilidade dos equipamentos para os clientes, reduzindo seus custos de operação e manutenção.

Ainda com relação à redução de custos, além dos custos citados acima, também é possível atingir uma redução nos custos dos processos de fabricação e montagem dos componentes, no processo para conservação do fluido de enchimento limpo e também com relação a reclamação de despesas com garantia devido as falhas prematuras do produto.

Importância do tema

Toda organização com fins lucrativos visa sempre otimizar o seu processo produtivo, a fim de reduzir custos sem, contudo, comprometer a qualidade e confiabilidade de seus produtos, que são basicamente os principais fatores de competitividade das empresas.

Nos últimos anos, com a globalização e o fluxo mundial de informações (Internet), os produtos e serviços do outro lado do planeta estão cada vez mais próximos dos consumidores, oferecendo-lhes muito mais opções de escolha do que no passado. Essa nova realidade da relação entre clientes e fornecedores levou as organizações a trocar os seus antigos paradigmas de protecionismo por estratégias a nível globalizado.

Assim, o controle de contaminação por contagem de partículas pode ser um diferencial de mercado para as empresas que efetivamente o implantarem em seu processo interno de fabricação e montagem. O acompanhamento efetivo do produto no campo também é de suma importância para manter o nível de limpeza dos fluidos de acordo com o especificado pelo fabricante.

Manter limpos os sistemas de fluidos não é apenas uma opção, mas sim uma necessidade, que requer o comprometimento em todos os níveis, envolvendo toda a cadeia do sistema, como os fornecedores de peças e conjuntos, os fabricantes e revendedores dos equipamentos e os clientes ou usuários finais desses equipamentos.

Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo demonstrar que através do controle da contaminação é possível minimizar o impacto negativo das falhas prematuras e até mesmo falhas catastróficas ocorridas nos sistemas de transmissão de força devido ao excesso de contaminantes no fluido. Para tal, o controle da contaminação deve abranger todas as fases do processo de construção do produto, ou seja, desde seu projeto de concepção até sua manutenção no campo, englobando as fases intermediárias referentes à fabricação de componentes, montagem e teste de conjuntos, e a montagem de componentes e conjuntos no produto final. Este controle de contaminação deve ser também estendido ao fluido, principalmente nas etapas de formulação, transporte e abastecimento do fluido novo. Mostrar que não basta apenas manter no processo equipamentos de limpeza e de controle robustos, pois a maioria desses processos é manual e dependem do homem. Dessa forma, se faz necessário à mudança de cultura e a quebra de paradigmas com relação à mudança e adaptação a esse novo processo. Para verificar se o fluido de transmissão de força do produto final atende os níveis aceitáveis de contaminação, o mesmo será monitorado através da contagem automática de partículas, pelo fato deste medir a quantidade de partículas contido na amostra independentemente do tipo e tamanho dos contaminantes, mesmo em se tratando de tamanhos imperceptíveis a olho nu. Esse foi o método adotado para a medição da contaminação do fluido novo e também do fluido do produto na condição de embarque. O resultado da contagem de partículas será uma condição de validação de todas as etapas do processo. Após o contato do fluido novo com os componentes e conjuntos do sistema ocorrerá um banho, uma lavagem dos mesmos, e todos os contaminantes serão conduzidos ao reservatório principal do produto. Ocorrerá uma homogeneização dos contaminantes no volume do fluido e parte desses contaminantes será retida pelo sistema de filtragem do produto. A quantidade de partículas retidas pelo sistema de filtragem será definida segundo a capacidade de retenção do mesmo. No entanto, faz-se necessário estabelecer parâmetros de aceitação do nível de contaminação, o qual será estabelecido segundo o tipo de tecnologia

incorporada ao produto. Mostrar que através do controle efetivo da contaminação em todas as fases do processo será possível reduzir os custos operacionais e as despesas adicionais com pagamentos de garantia, proporcionadas pelas falhas indesejáveis do sistema de transmissão de força.

Metodologia

A metodologia utilizada para atingir os objetivos propostos no item anterior foi a pesquisa bibliográfica em livros específicos, apostilas e catálogos de fabricantes de componentes de sistemas de transmissão de força por fluidos, normas internacionais que estão relacionadas com o tema, Internet, além da experiência pessoal do autor, possibilitando conhecer a metodologia, as fases e procedimentos de implementação, as dificuldades e desafios encontrados nessas fases e as soluções propostas para se atingir e manter os níveis de limpeza dos fluidos de acordo com os requisitos mínimos desejáveis.

Síntese dos capítulos deste trabalho

No Capítulo 1 são apresentados os principais conceitos teóricos relacionados com o controle de contaminação de fluidos de sistemas hidráulicos, realçando-se a importância dos mesmos para os sistemas, o princípio da contaminação e seus efeitos, o desgaste característico dos principais componentes desses sistemas, os tipos de análises utilizadas para determinar o nível de contaminação, os principais tipos de filtração utilizados e as recomendações de limpeza dos fluidos aplicados em sistemas de transmissão de força.

O Capítulo 2 apresenta uma aplicação real do controle de contaminação de fluidos por contagem de partículas, com todos os procedimentos adotados, abrangendo os objetivos da implantação desse novo processo, o planejamento e os passos adotados para a implantação, os problemas surgidos e as soluções sugeridas, os resultados alcançados e as perspectivas para o futuro.

Apresentam-se as principais conclusões do trabalho no Capítulo 3, com base nos objetivos aqui propostos, encerrando-se com as Referências Bibliográficas.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Vickers (1977), a hidráulica está diretamente relacionada com o estudo de características e uso dos fluidos, mais especificamente o uso de fluido confinado para transmitir, multiplicar forças e modificar movimentos. Sistema hidráulico é definido como um meio de transmitir energia através de uma pressão exercida sobre o fluido. O fluido hidráulico confinado é um dos meios mais versáteis de modificação e transmissão de energia. Pode ainda assumir instantaneamente formas das mais variadas e penetrar no interior de qualquer objeto que não possua capacidade de bloquear o seu avanço. É capaz de se dividir em partes, sendo que cada uma realiza um trabalho distinto, com velocidades e pressões diferentes, de acordo com o funcionamento do sistema, podendo em seguida se reagrupar novamente em um só corpo. Nenhum outro meio é capaz de combinar o mesmo índice de positividade, exatidão e flexibilidade, mantendo a capacidade de transmitir um máximo de força num mínimo espaço físico e de tempo, permanecendo dentro de uma variabilidade muito pequena.

Os sistemas hidráulicos têm sido aplicados para facilitar a força física do homem, necessária à realização de um trabalho rápido, exato e confiável, absorvendo, assim, um mínimo de energia humana.

1.1 Importância dos fluidos nos sistemas hidráulicos

O termo fluido, na hidráulica, refere-se ao líquido utilizado como meio de transmitir energia, sendo ele um óleo base de petróleo especialmente composto com aditivos ou um fluido especial à prova de fogo, podendo ainda ser um composto sintético. O fluido base pode ser classificado em três categorias distintas: hidrocarbonetos lineares/ramificados (parafinas),

hidrocarbonetos cíclicos (aromáticos, naftênicos, compostos contendo enxôfre, nitrogênio e oxigênio) e sintéticos. Em geral, os fluidos destinados ao uso hidráulico são enriquecidos através da adição de pacotes de aditivos, compostos em sua maioria por dispersantes, detergentes, antioxidantes, anticorrosivos, antidesgaste, aditivos de pressão extrema (EP) e melhoradores do índice de viscosidade (IV).

Os aditivos têm, como funções básicas, prevenir a oxidação dos componentes, prevenir a formação de lodo, goma e verniz, diminuir a formação de espuma, manter a estabilidade do óleo, reduzir o custo de substituição, manter um índice de viscosidade relativamente estável numa faixa larga de variação da temperatura de operação, prevenir a corrosão e erosão, promover a separação da água e estabelecer compatibilidade com os vedações de borracha e gaxetas.

Além dos requisitos de qualidade mencionados, os fluidos hidráulicos possuem algumas objetividades primárias, que são a transmissão de energia, a lubrificação de peças móveis, a vedação das folgas entre estas peças e o resfriamento e dissipação de calor. Num sistema hidráulico, a aplicação do fluido correto é imprescindível, podendo atuar na redução do desgaste interno dos componentes, prolongando sua vida útil, além de proporcionar um maior desempenho para o produto. (Vickers, 1977).

1.2 Introdução à contaminação em sistemas de fluidos

Sinônimo de controle de desgaste em sistemas de fluidos, o controle de contaminação é o centro do que de mais moderno existe em sistema tecnológico em fluido. Aplicando-se esse tipo de controle, pode-se alcançar excelência em eficiência, confiabilidade dos produtos e dos serviços. Objetivos de produtividade e lealdade dos clientes podem ser alcançados com o controle de contaminação dos fluidos.

Contaminação é definida como qualquer material ou substância estranha, ou ainda energia indesejada no sistema de transmissão por fluidos, que possa causar deterioração no sistema operacional, na vida dos serviços ou na confiabilidade do produto. A presença de contaminantes no fluido de um

sistema tem um efeito nocivo sobre o processo de deterioração do desempenho dos componentes (Fitch, 1991).

Como já mencionado anteriormente, os fluidos hidráulicos são compostos basicamente por óleo base e aditivos. Assim, todo e qualquer corpo ou elemento estranho a essa composição, ou seja, tudo aquilo que não faz parte da composição química do fluido é considerado contaminação.

Quando se fala em contaminação de sistemas hidráulicos por partículas, logo imagina-se e preocupa-se com partículas visíveis, como cavacos de usinagem, areia, pedaços de madeira, pano, plástico, flocos de tinta e muitos outros. Na verdade, há que se preocupar com a sujeira e outros contaminantes que não se podem ver, partículas tão pequenas quanto às de 2 a 30 μm , que são as mais prejudiciais para os sistemas hidráulicos. Essa ínfima medida é de difícil compreensão; porém, para melhor entendimento de seu tamanho, inicia-se com a menor partícula que a maioria das pessoas pode enxergar, isto é, a porção de poeira que se concentra na tela de uma televisão, a qual contém aproximadamente 40 μm de diâmetro. Esse tamanho é, portanto, a menor partícula perceptível a olho nu. Assim, deve-se preocupar com os contaminantes invisíveis a olho nu.

Correlacionando os tamanhos de partículas, pode-se concluir, numa rápida constatação, que uma partícula de 5 μm de diâmetro é exatamente 1/8 de uma figura de 40 μm de diâmetro, mas, para se compararem apropriadamente os tamanhos, deve-se relacionar a seção transversal das partículas e não os diâmetros.

Figura 1 - Visualização do tamanho de partículas

Fonte: Caterpillar Hydraulic Systems Management Guide (1999)

Dessa forma, observa-se que as partículas de 5 μ m são, na realidade, 1/64 do tamanho da partícula de 40 μ m. Uma outra referência para se entenderem e se compararem os tamanhos de partículas é o fio de cabelo humano, que, em geral, possui um diâmetro que varia entre 70 e 80 μ m. Alguns detalhes da questão aqui abordada estão demonstrados na Figura 1. Os contaminantes podem ser dos mais variados tipos e formas; os mais comuns encontrados são areia, tinta, partículas metálicas, borracha, fibras, plástico, sujeira, água e ar. Geralmente, os contaminantes possuem cantos vivos, são irregulares na forma e causam abrasão nas superfícies internas dos componentes de um sistema hidráulico, gerando, assim, contaminantes adicionais (Pall, 1990). Os contaminantes podem tirar vantagem de muitas oportunidades para entrar nos sistemas hidráulicos, como se destaca a seguir.

1.3 Projetando sistemas de transmissão de potência por fluidos com controle de contaminação

Com o aumento substancial das pressões em sistemas de transmissão de potência por fluidos e a redução significativa da tolerância entre os componentes de sistemas hidráulicos, o controle de contaminação tornou-se muito mais importante do que fora anteriormente. Quando se olha dentro de uma linha de características econômicas, a falha de um sistema hidráulico traz paradas inesperadas de produção e indesejados custos de manutenção. Assim, a indústria é diretamente afetada, caso não seja efetivo o controle de contaminação como um todo.

Muitos dos sistemas de transmissão de força por fluidos estão em operação na indústria por muitos anos; foram construídos em uma época em que os aspectos de desempenho dos sistemas de potência de fluidos estavam em rápida evolução, trazendo inovações nos projetos de sistemas e componentes, incluindo pressão maior, miniaturização, válvula eletro-hidráulica, servo-válvula, e outras. Infelizmente, o desempenho dessa nova tecnologia deixa a desejar, uma vez que não se deu a devida importância ao controle de contaminação, tornando-se imperiosa a busca de uma nova tecnologia com tal finalidade. Conseqüentemente, projetistas e construtores

deram pouca importância a esse aspecto tão crítico relacionado com o projeto do sistema como um todo (Norvelle, 1984).

A indústria vem pagando um alto preço por não ter dado atenção a esse detalhe da contaminação quando do projeto e construção do equipamento. Uma alta porcentagem de falhas nos sistemas de transmissão de potência por fluido pode ser atribuída à contaminação do fluido. Isso é verdade principalmente quando estão envolvidos tipos de falhas ocasionadas por degradação e perda de desempenho. Falha em uma bomba hidráulica que não desenvolve pressão ou vazão suficiente e vazamento interno ou travamento de uma válvula hidráulica pode ser atribuída à grande quantidade de partículas de contaminação contida no fluido hidráulico.

Entretanto, os sistemas podem ser projetados com controle de contaminação como critério básico. Quando isso é feito, muitos atingem um alto nível de produtividade e confiabilidade, e a vida dos componentes pode exceder a expectativa. Infelizmente, muitas empresas continuam pensando como no passado: "isso sempre funcionou assim, foi projetado há vinte anos e continua funcionando até hoje". Como os clientes buscam por equipamentos com maior desempenho e versatilidade, é provável que não haja mais espaço no mercado para empresas com esse tipo de filosofia (Norvelle, 1984).

Em termos básicos, existem quatro etapas distintas para controlar a contaminação: *por exclusão, por detecção, por remoção e por redução* de efeitos da contaminação. Esses passos não são de tão simples identificação e controle. Geralmente, é mais fácil e economicamente viável controlar a contaminação antes de embarcar o produto do que tentar modificá-lo depois, pois o esforço despendido para manter a confiabilidade do produto será muito maior. O controle de contaminação é parte integral da confiabilidade de um sistema de transmissão de potência por fluidos (Norvelle, 1984).

Fabricantes de equipamentos estão oferecendo continuamente produtos com períodos de garantia estendida, prolongando o tempo de vida útil e assegurando operações seguras para seus equipamentos. Proprietários e operadores têm solicitado, em paralelo, equipamentos mais confortáveis e fáceis de operar e com procedimentos de manutenção mais simples. Nos últimos anos, com a tendência do aumento dos intervalos de troca do óleo devido ao custo e ao descarte do óleo em razão dos impactos ambientais, tem-

se diminuído a tolerância das propriedades do óleo. Dessa forma, engenheiros enfrentam novos desafios quanto aos projetos de novos equipamentos, explorando ao máximo o uso dos parâmetros do óleo, garantindo assim uma operação longa e segura para os equipamentos. Para manter o *desempenho* dos equipamentos, é necessário controlar certos parâmetros do óleo, sendo que desses o controle de contaminação é o mais crítico (Sommer, 2002).

1.3.1 Controle por *exclusão* da contaminação

É utopia dizer que as partículas de contaminação podem ser completamente removidas do fluido de um sistema de transmissão de força. Se um sistema é projetado para ser limpo, teoricamente deveria operar para sempre e sem necessidade de se filtrar o fluido. Nesse caso pareceria óbvio que esse sistema nunca falharia por problemas relacionados com contaminação. Isso, na verdade, é apenas uma utopia, pois as partículas dos contaminantes, antes de serem totalmente removidas, geram outras partículas através da fadiga de componentes, erosão de superfícies causadas pelo fluido, desgaste de superfícies metálicas e não metálicas, gerando, assim, detritos que provocam mais desgaste.

Embora a ausência total de contaminantes seja impossível, a exclusão da máxima quantidade de partículas durante o primeiro passo é muito importante para assegurar a confiabilidade do produto. A exclusão se inicia na fase de projeto, através da definição correta do tipo de reservatório do fluido, bem como dos tipos de vedação utilizados nos cilindros hidráulicos.

Obviamente existe a oportunidade de contaminação do sistema através do ingresso de sujeira da atmosfera, o que ocorre através do respiro do reservatório do fluido. Assim, reservatório vedado e sem respiro de ar seria o ideal. No entanto, se no projeto for requerido o uso de respiro de ar, deve-se ter atenção cuidadosa com relação ao tipo de filtro de ar a ser escolhido, dada a grande variedade de tipos que podem ser utilizados.

Se um reservatório pode ser projetado para suportar uma pequena sobrepressão, pode ser útil a utilização de respiro com uma válvula de pressurização incorporada. O princípio de operação dessa válvula é muito

simples. No início de operação do sistema, um determinado volume de óleo sai do reservatório e vai preencher as linhas hidráulicas e, conseqüentemente, cria-se vácuo no interior do reservatório, fazendo com que a válvula se abra, admitindo ar da atmosfera. No entanto, quando o fluido retorna para o reservatório, neste é gerada uma pressão interna. Caso esta esteja acima da capacidade dimensionada para o reservatório, a válvula se abre, fazendo com que uma porção do ar seja colocado para fora do reservatório, conforme demonstrado na Figura 2.

Figura 2 – Construção típica de um reservatório hidráulico
 Fonte: Caterpillar Hydraulic Systems Management Guide (1999)

Um projeto efetivo nesse caso deveria ter a pressão de alívio regulada ligeiramente acima da máxima pressão em que o reservatório é submetido em condições normais de operação. Isso torna vedado ou selado após a primeira admissão de ar, quando do enchimento das linhas hidráulicas, reduzindo e prevenindo a contaminação contida no ar da atmosfera.

Uma outra forma de se permitir a entrada de sujeira dentro de sistemas e, conseqüentemente, causar a contaminação do fluido é a vedação das hastes dos cilindros hidráulicos, o que ocorre a cada movimento de recolhimento feito

pela haste do cilindro. Partículas sólidas são depositadas sobre a haste e podem penetrar no sistema através de vedação inadequada. Outra importante forma de exclusão ou prevenção da contaminação envolve o processo de manufatura e procedimentos de manutenção.

Durante o processo de manufatura, deve-se manter atenção especial sobre a limpeza dos componentes do sistema hidráulico. A limpeza adequada dos componentes não se refere somente à remoção de partículas soltas deixadas pelo processo de manufatura, mas também àquelas aderidas aos componentes, principalmente nas seções roscadas. Para minimizar essa condição adversa, poder-se-á utilizar sistemas de lavagem por turbulência, o que permite alcançar o nível de limpeza requerido.

Ainda no processo de manufatura, um outro fator importante é o controle sobre o fluido dos sistemas de testes de desempenho de conjuntos hidráulicos, tais como bombas, cilindros, válvulas, motores, entre outros, que podem ocasionar contaminação desses conjuntos mesmo antes de serem incorporados ao produto.

Embora sem intenção, muitas manutenções realizadas em equipamentos hidráulicos acabam comprometendo sua vida útil. Práticas pobres de manutenção contribuem significativamente para a introdução de contaminantes dentro dos sistemas. Isso ocorre devido a: limpeza inadequada do local de trabalho; práticas inadequadas de armazenagem de componentes, sem nenhum tipo de proteção contra contaminação por poeira; técnicas e ferramentas inadequadas de reparo; não-necessidade de remoção ou substituição de componentes durante manutenção preventiva; uso de recipientes inadequados de armazenagem e abastecimento dos sistemas com fluido hidráulico (Norvelle, 1984).

Com relação ao abastecimento dos sistemas com fluido, trata-se de um problema especial por duas razões: a primeira se refere à dificuldade de treinar o pessoal da manutenção para utilizar sempre equipamentos limpos em suas atividades cotidianas, porque eles não entendem que a limpeza da qual se trata aqui é a nível microscópico; a segunda corresponde à idéia de que óleo novo é óleo limpo. De fato, quando o óleo novo é adicionado ao sistema, existem 99.9% de chance de que o nível de contaminação do óleo novo esteja além do

nível de tolerância permitido para o sistema, o que é verdadeiro especialmente se o fluido for armazenado em tambores metálicos (Bensch, 1984).

Isso pode ser explicado pela forma incorreta de armazenagem dos tambores a serem abastecidos com o fluido. Os tamanhos de partículas encontradas após a coleta e análise do fluido foram, em média, de 15 μ m e, em alguns casos, podendo chegar até 50 μ m. Muito dos contaminantes encontrados no óleo novo foram flocos de oxidação e tinta que se desprenderam do tambor durante o processo de enchimento (Day, 1984).

1.3.1.1 Contaminantes incorporados como resultado natural do processo de fabricação de componentes

Este é, sem dúvida, um dos processos que mais contribuem para a contaminação do fluido de um sistema hidráulico. Todo contaminante remanescente do processo de lavagem ou limpeza após a fabricação é carregado pelo fluido quando do contato com este. A alta pressão associada à velocidade e à temperatura do fluido pode também resultar num processo de decapagem dos componentes metálicos, quando todos os contaminantes removidos dos componentes metálicos e não-metálicos tendem a se locomover na mesma direção do fluxo hidráulico e em direção ao reservatório principal. Mesmo a utilização de técnicas especiais de lavagem, como, por exemplo, o uso de produtos para decapagem química e detergentes especiais, não consegue remover todos os contaminantes, pois isso depende muito da complexidade geométrica dos componentes. Existem ainda outras formas de agregar contaminantes relacionados a esse processo: quando da utilização de fluidos protetivos, contaminados com excesso de partículas sólidas ou água, nas superfícies metálicas para prevenir a oxidação e também por contaminação do ambiente (Pall, 1990).

Para minimizar a adição de contaminantes por esses processos são necessários alguns cuidados especiais, como a necessidade de filtração do fluido protetivo para remoção de partículas sólidas e água, além da necessidade de manter os recipientes, contendo o fluido protetivo, fechados e limpos durante a estocagem, minimizando, assim, a adição de contaminantes

relacionados à aplicação de fluido protetivo. Com relação ao ambiente, a contaminação ocorre quando se tem um ambiente agressivo com partículas sólidas em suspensão; geralmente a maior parte dos ambientes de fabricação possui essa característica e, logo, os contaminantes em suspensão depositar-se-ão sobre a superfície limpa, agregando mais contaminação ao componente. O acúmulo de contaminação será tanto maior quanto maior for o tempo de permanência dos componentes sem embalagem. Fechando o ciclo do processo fabricação, observa-se a importância e a contribuição dadas pelas embalagens. Estas, se aplicadas corretamente, irão prevenir que contaminantes adicionais se acumulem sobre os componentes, garantindo, assim, o mesmo nível de limpeza oriundo do processo de lavagem (Fitch, 1983).

1.3.1.2 Contaminantes incorporados durante o teste de desempenho dos conjuntos hidráulicos

Conjuntos hidráulicos, tais como bombas, motores, cilindros, válvulas e outros, requerem, em sua maioria, testes de desempenho e de vazamentos internos após a montagem. Esses conjuntos requerem peças limpas, ambientes e processos de montagem limpos. Porém, também é de suma importância que os fluidos utilizados para os ensaios e testes estejam extremamente limpos. O teste a ser realizado também funcionará como um sistema de lavagem, ou seja, injeta-se óleo limpo dentro dos conjuntos, o qual, por sua vez, carrega consigo os contaminantes remanescentes dos processos de fabricação e montagem para dentro do reservatório do equipamento de teste. Para manter limpo o óleo de teste desde o início até o final dos testes, é necessária a utilização de sistemas especiais de filtragem, pois, além dos contaminantes agregados no processo de fabricação e montagem, têm-se também contaminantes adicionais gerados pelos ajustes das partes metálicas dos conjuntos sob teste. Como no processo de fabricação, após o término do ciclo de teste, é de extrema importância a utilização de embalagens protetivas, principalmente nos orifícios de entrada e saída dos conjuntos, para se evitar a introdução de contaminação adicional (Pall, 1990).

1.3.1.3 Contaminantes incorporados ao sistema durante o processo de montagem

Sistemas hidráulicos são conjuntos que agregam em sua estrutura muitos componentes durante a montagem. Tais componentes devem permanecer com as aberturas de entrada e saída de fluido vedadas ao longo de todo processo de montagem, a fim de prevenir que contaminantes adicionais se depositem sobre as superfícies desprotegidas devido à condição ambiental do local da montagem. O homem tem papel fundamental nesse processo, pois será necessário mais que seu comprometimento, ou seja, é necessária uma mudança de cultura na sua conduta de trabalho. Manter os locais e ferramentas de trabalho limpas, bem como ter o devido cuidado no manuseio durante a montagem, também são essenciais para evitar a deposição de contaminantes adicionais.

Lubrificante utilizado para montagem de vedações pode ser uma outra forma de adicionar contaminantes durante a montagem, o que se dá sob duas condições distintas: recipientes que ficam abertos ao tempo e que agregam contaminantes do ambiente ou a própria formulação química dos lubrificantes que causam incompatibilidade com o fluido do sistema hidráulico, podendo ocorrer uma reação química entre si, ou ainda excesso de partículas sólidas dos lubrificantes e que não se dissolvem quando em contato com o fluido hidráulico (Pall, 1990).

1.3.1.4. Contaminantes arrastados para dentro do sistema através do sistema de vedação

Além da ineficiência das vedações dos cilindros, uma outra forma de contaminação dos sistemas de fluidos se dá através dos riscos nas hastes dos cilindros hidráulicos, que são considerados um dos principais meios de contaminantes entrarem em sistemas hidráulicos. Os contaminantes que se depositam nos riscos das hastes dos cilindros durante o processo normal de operação passam livremente pelos raspadores e anéis de vedação e seguem para dentro dos sistemas. Nem mesmo as vedações em bom estado inibirão a

passagem dos contaminantes depositados nos riscos. Uma vez dentro do sistema, as partículas sólidas dos contaminantes poderão riscar as paredes internas da camisa do cilindro, ocasionando a geração de contaminantes adicionais e provocando vazamento interno no cilindro. O desgaste das vedações dos cilindros pode ser uma outra maneira de contaminantes entrarem no sistema, pois não reterão com eficiência todos os contaminantes que se depositarem sobre as hastes durante a operação com o produto. Como forma de prevenção, devem ser utilizadas proteções especiais para evitar batidas e riscos nas hastes (Pall, 1990).

1.3.1.5. Contaminantes introduzidos durante a manutenção do sistema hidráulico

Quando um sistema é aberto para manutenção, quer seja ela preventiva ou corretiva, está sujeito à contaminação. São necessários alguns cuidados especiais para minimizar a introdução de contaminantes no sistema. Além daqueles já citados anteriormente, como manter os locais e ferramentas de trabalho limpos, também é de extrema importância manter devidamente fechadas as partes dos conjuntos que foram abertos para reparo para não adicionar contaminantes durante o tempo em que o sistema permanecer em reparo.

Como nas citações anteriores, a contribuição do homem é fundamental neste processo, pois deverá ter consciência de que suas atitudes poderão manter um sistema limpo ou até mesmo contaminá-lo. O fator diferencial é que o homem deverá estar muito bem treinado e conscientizado para saber diferenciar o certo do errado, tendo o senso crítico de utilizar peças em bom estado de conservação e limpeza durante a manutenção. Ressalta-se também neste processo a importância da utilização de fluidos adequados e limpos para a lavagem dos componentes que serão reutilizados no sistema. A utilização de solventes clorados como fluido de limpeza dos componentes metálicos poderá trazer conseqüências severas, pois alguns desses solventes, em contato com água por um determinado período de tempo, poderão reagir e resultar num

ácido clorídrico que certamente atacará os componentes metálicos do sistema, dando início à formação de oxidação em seu interior (Pall, 1990).

1.3.1.6. Contaminantes incorporados ao fluido novo

O fluido utilizado no primeiro enchimento de um sistema hidráulico deverá ser um fluido limpo em relação à quantidade de partículas sólidas em suspensão e água livre. O nível de contaminação dos fluidos comerciais destinados à indústria e principalmente ao mercado consumidor de reposição não atende aos requisitos de limpeza recomendados pelos fabricantes de conjuntos e sistemas hidráulicos.

A contaminação no fluido hidráulico novo pode ser atribuída a diversos fatores: contaminantes que são incorporados durante o processo de fabricação do fluido novo, e nesse caso é fundamental manter os tanques de mistura e homogeneização e linhas de enchimento limpas, controlar o nível de contaminação do óleo base durante o transporte, descarregamento e estocagem, controlar o nível de contaminação dos pacotes de aditivos e sua influência no produto final, finalizando a etapa que se refere à preparação do fluido.

Salienta-se a necessidade de cuidados especiais com a limpeza dos recipientes em que serão estocados os fluidos para comercialização, pois a embalagem suja ou oxidada poderá comprometer todo o processo. Com relação a contaminantes incorporados ao fluido novo durante os processos de transporte, estocagem e manuseio do óleo novo no transporte, deve-se evitar o movimento brusco dos recipientes, pois choques mecânicos, como batidas externas nas embalagens, desprenderão partículas em suas paredes internas, principalmente as metálicas, aumentando a quantidade de partículas livres no fluido. Na estocagem, recomenda-se manter os recipientes contendo o fluido na posição horizontal durante o estoque, para evitar que o acúmulo de água ou umidade na parte superior dos recipientes resulte em condensação de água para dentro da embalagem, com posterior formação de água livre. No manuseio, recomenda-se manter o recipiente com o fluido novo fechado durante o processo de enchimento do produto, além de cuidados especiais

com a limpeza de acessórios utilizados para o enchimento, como bombas, mangueiras, tubos, funis e outros (Pall, 1990).

1.4 Controle por *detecção* da contaminação

A efetiva detecção de partículas contaminantes em sistemas de fluidos depende de um bom programa de monitoramento do fluido. Para o sucesso total, como requisito do programa, se faz necessário definir um local adequado para captura de amostragens representativas, técnicas de coleta de amostragem e equipamentos que previnam a adição de contaminantes na amostra de fluido e métodos de análises que tenham acuracidade e confiabilidade.

Dos itens relacionados, apenas o local ou ponto de coleta da amostra pode ser considerado parte do projeto do produto. Para se obter um bom resultado na análise, é de extrema importância a localização do ponto de coleta. Para se ter a representatividade da amostra, é recomendado que o ponto de coleta seja instalado após a bomba e antes do sistema de filtragem. Recomendam-se, para esses pontos, conectores do tipo engate rápido para a coleta da amostra para análise em laboratório ou mesmo medição na própria linha de fluido através de contador automático de partículas. Como método de análise, podem ser usadas análises quantitativas por gravimetria, ferrografia, espectrometria e contagem de partículas (Norvelle, 1984).

1.4.1 Principais tipos de análise de contaminação nos fluidos

Existem diversos sistemas de medição de níveis de contaminação, cada um deles apropriado para atender a requisitos especializados. Para análise de contaminação em fluidos hidráulicos com sistemas de filtração, o sistema mais comumente adotado é o de contagem óptica ou automática de partículas; porém, é importante se conhecerem quais são as outras técnicas adotadas para contagem, além das mencionadas anteriormente.

A limitação de cada sistema e a qualidade das técnicas de amostragem deverá ser considerada para garantir a confiabilidade dos resultados obtidos. As amostras dos fluidos dos sistemas hidráulicos devem ser representativas para se obterem resultados consistentes, indicando, assim, o correto nível de limpeza da amostra. Diversas amostras deverão ser coletadas em diversos pontos do sistema hidráulico e, assim, efetuar a comparação entre os resultados, buscando se determinar então o melhor ponto para a coleta da amostra. Para os sistemas hidráulicos em geral, recomenda-se a coleta de amostras em locais de turbulência do sistema hidráulico, como, por exemplo, em conexões curvas ou cotovelos das tubulações. Caso haja sistema de filtração, além da coleta em locais de turbulência do fluido, recomenda-se também que esta seja feita antes do sistema de filtração, determinando, assim, a mesma condição do fluido que está no reservatório principal do equipamento.

1.4.2 Teste gravimétrico

A contaminação insolúvel pode ser determinada pela passagem de um determinado volume de óleo através de uma membrana de filtro, sendo medida como um incremento do peso da membrana filtrante. Este método de teste consiste em determinar a quantidade de massa de contaminação contida na amostra do fluido hidráulico. Para a realização do teste, é necessária a utilização de membranas filtrantes, filtração absoluta, como meio físico para separar os contaminantes sólidos do fluido hidráulico e, dessa forma, todos os contaminantes sólidos são retidos pela membrana filtrante (ASTM4898, 1990).

Segundo Mirshawaka (1991), os teste gravimétricos são, em geral, efetuados em laboratório, dada a necessidade de alguns cuidados especiais para se obterem resultados consistentes. Nesse teste é necessária a utilização de vários equipamentos de laboratório, como, por exemplo, forno tipo estufa, bomba de vácuo acoplada a um *kitassato* para auxiliar e agilizar a filtração do fluido, dessecador para resfriar a membrana e, ainda, balança de alta precisão. O teste gravimétrico deve obedecer a uma seqüência lógica, começando pela coleta da amostra em frascos e locais apropriados. Antes de utilizar a

membrana na filtragem do fluido, é necessário fazer sua secagem em estufa, resfriamento imediato em um dessecador e, em seguida, pesagem para determinar o valor de sua massa. Após a filtragem do fluido, adota-se o mesmo procedimento de secagem, resfriamento e pesagem referido anteriormente; assim, a diferença entre a massa final e inicial da membrana é o valor da massa de contaminantes contida na amostra de fluido. A unidade de medida comumente utilizada para expressar a quantidade de contaminação no fluido hidráulico é miligrama/ mililitro. Esse tipo de análise indica a quantidade total de contaminantes, porém não distingue as partículas por tamanho e quantidade, sendo sua sensibilidade limitada por enormes diferenças dos níveis de qualidade dos particulados. Os equipamentos utilizados para análise gravimétrica estão representados na Figura 3.

Figura 3 – Equipamentos usados para análise gravimétrica

Fonte: Caterpillar Hydraulic Systems Management Guide (1999)

1.4.3 Ferrografia

A ferrografia é uma técnica de monitoramento de fluidos e diagnose de condições de máquinas e equipamentos. A partir da quantificação e análise da

morfologia das partículas de desgaste, encontradas nas amostras dos fluidos, determinam-se: tipos de desgaste, contaminantes, desempenho do lubrificante, etc. A ferrografia foi desenvolvida, originalmente, para aplicações na aeronáutica militar em 1975, nos Estados Unidos da América, sob o patrocínio da *Naval Air Engineering Center*. O objetivo foi a obtenção de maior confiabilidade no diagnóstico de condições de máquinas, tais como caixas de engrenagem e turbinas de helicópteros militares. O principal motivo de seu desenvolvimento deve-se às limitações que outras técnicas apresentavam. Vários eram os casos em que o alcance dessas técnicas não podia antecipar a ocorrência de defeitos e apontar as reais causas de desgaste. Liberada para uso civil em 1982, a ferrografia foi trazida para o Brasil em 1988. A análise por ferrografia pode ser *Analítica* e *Quantitativa* (Santos, 1999).

1.4.3.1 Ferrografia Analítica (AN)

Permite a identificação visual das partículas contidas nas amostras dos fluidos, objetivando o descobrimento dos tipos de desgastes originários.

A mostra do fluido é bombeada lentamente sobre uma lâmina de vidro, também conhecida como ferrograma. As partículas que estavam contidas na amostra do fluido se depositam sobre a lâmina, sendo analisadas posteriormente com o auxílio de um microscópio óptico especial (ferroscópio). As dimensões de um ferrograma são: 25mm x 60mm x 0,7mm. A lâmina do ferrógrafo analítico, sofre a ação de um campo magnético cuja distribuição das linhas de força não é uniforme, mas de intensidade menor na entrada do fluxo e, num gradiente crescente, tem sua intensidade máxima na saída.

Dessa forma, à medida que a amostra flui por sobre a lâmina, as partículas ferromagnéticas de maior tamanho são depositadas logo na entrada. Avançando-se no ferrograma, encontramos as partículas de tamanhos menores. Na saída, observamos as partículas de até 0,1µm. Essas partículas são identificadas pela forma com que se alinham, seguindo a direção das linhas de força do campo magnético. As partículas paramagnéticas ou não magnéticas (ligas de cobre, alumínio, prata, chumbo, etc. e contaminantes, como areia, borracha, fibras de pano, papel etc.) depositam-se de forma

aleatória. São encontradas ao longo de todo ferrograma. Ao final do bombeamento da amostra, circula-se um solvente especial, isento de partículas, que "lava" o ferrograma, levando consigo o lubrificante. Até 98% das partículas presentes na amostra permanecem retidas na lâmina. Após a secagem, o ferrograma está pronto para ser examinado no ferrosκόpio. Todo material utilizado na ferrografia é descartável. Cada tipo de desgaste pode ser identificado pelas diferentes formas que as partículas adquirem ao serem geradas (Santos,1999).

O ferrograma nada mais é do que uma placa com as partículas de desgastes retidas sobre a superfície, conforme demonstrado na Figura 4. Tradicionalmente, a interpretação gráfica de um ferrograma envolve um perfil de densidade ao longo do comprimento da placa, de acordo com a linha de força do campo micromagnético (Vlasov,1999).

Figura 4 – Ferrograma Típico

Fonte: A ferrographic method for wear diagnostics of High-strength Materials Vol.65 (1999)

1.4.3.2 Ferrografia Quantitativa (DR)

A ferrografia de leitura direta (*Direct Reading* = DR) ou quantitativa, utiliza os mesmos princípios da ferrografia analítica. A diferença está no formato do corpo-de-prova e no método de leitura. O corpo-de-prova (conjunto tubo-precipitador) é formado por uma mangueira de plástico, um tubo de vidro e uma mangueira de drenagem. O tubo de vidro é instalado sobre o campo magnético especial, da mesma forma que o ferrograma. Duas regiões deste

tubo são iluminadas de baixo para cima por uma fonte de luz controlada. A sombra formada pelas partículas que se depositam no tubo é observada por fotocélulas ligadas ao circuito microprocessador. Assim como no ferrograma, as partículas se precipitam de forma ordenada por tamanho. O tubo precipitador é dividido em duas regiões em que se encontram as partículas maiores que $5\mu\text{m}$, chamadas Grandes (*Large* = L) e menores ou iguais a $5\mu\text{m}$, chamadas Pequenas (*Small* = S). A unidade utilizada na ferrografia quantitativa é exclusiva e arbitrada (Santos, 1999). Para 50% da área do tubo coberta por partículas foi arbitrado o número 100, adimensional. A leitura fornecida pelo instrumento é diretamente proporcional à concentração de partículas da amostra. O manuseio dos valores de L e S permitem várias interpretações, tais como:

L = partículas grandes, maiores que $5\mu\text{m}$;

S = partículas pequenas, menores ou iguais a $5\mu\text{m}$;

L + S = concentração total de partículas;

PLP = $(L-S)/(L+S)*100$ = modo de desgaste.

A unidade utilizada na ferrografia quantitativa é a DR/ml. Sendo esta uma unidade própria da ferrografia, não é possível a determinação de um fator de conversão simples para outras unidades. Embora seja uma análise muito utilizada, fornece informações básicas que indicam, às vezes, a necessidade de um teste mais sofisticado, o que é devido à anormalidade dos resultados. A ferrografia é um teste limitado para detecção de partículas de ferro e aço (Baur, 1982).

1.4.4 Espectrometria

A espectrometria de absorção atômica ou de emissão óptica, em termos gerais, indica a presença de elementos químicos presentes na amostra do fluido hidráulico. A amostra é introduzida numa câmara de combustão e os materiais presentes são dissolvidos até o seu nível atômico. Cada elemento químico possui frequências particulares, como "impressões digitais", tornando possível sua identificação. Entretanto, esta técnica não consegue detectar partículas maiores que $8\mu\text{m}$ – a média do tamanho detectado está em torno de

5µm. Trata-se, portanto, de um sistema de medição limitado. É utilizado para quantificar os elementos como ferro, cobre, cromo, alumínio e outros que se originam do desgaste das diversas ligas metálicas que compõem os componentes dos sistemas hidráulicos, além do silício, proveniente da poeira.

A determinação dos elementos de desgaste metálico geralmente é feita por espectrometria de absorção atômica ou espectrometria de plasma de argônio induzido (ICP). Os teores de concentração de desgaste são medidos em partes por milhão (ppm). Essa questão da metodologia adotada para determinação do nível de contaminação é ainda um tanto confusa. Imagine-se uma amostra com partículas decorrentes de *pitting* ou cavitação em aço de baixo teor de liga (rolamentos), esfoliação em aço cementado (engrenagens) e ferrugem da carcaça. Na ferrografia, podemos distinguir cada uma delas; o resultado espectrométrico indicará concentração em ppm de um determinado elemento químico metálico ou até mesmo não-metálico (Santos, 1999). Em ambos os casos, não há parâmetros definidos por fabricantes de componentes hidráulicos para afirmar que o nível de contaminação contida no fluido afetará o desempenho do sistema hidráulico e de seus componentes; em geral, esse parâmetro é determinado na análise de contaminação por contagem de partículas (Meyers, 1985).

1.4.5 Contagem de partículas

A determinação do nível de contaminação por contagem de partículas é uma das técnicas mais utilizadas para determinar o nível de limpeza de fluidos hidráulicos. Este método consegue determinar com exatidão a quantidade de partículas sólidas contidas na amostra do fluido por faixa de tamanho das partículas, porém não determinam quais são os tipos de materiais dos contaminantes. A vantagem em relação à ferrografia é que a contagem de partículas engloba todos os tipos de contaminantes, sejam eles metálicos ou não-metálicos; já a ferrografia está limitada à análise de partículas de ferro e aço. A vantagem com relação à espectrometria de absorção atômica ou espectrometria de plasma de argônio induzido é que esta é limitada na medição do tamanho de partículas (não consegue detectar partículas maiores

que $8\mu\text{m}$) em relação à contagem de partículas cujo faixa de medição está entre $2\mu\text{m}$ e $100\mu\text{m}$. Uma outra vantagem é o fato de que, enquanto as outras metodologias de análise de fluidos trabalham com suposições de que o nível de contaminação pode afetar o desempenho e a vida útil dos componentes hidráulicos, a contagem de partículas trabalha com parâmetros comparativos e realísticos determinados pelos próprios fabricantes de componentes hidráulicos, estabelecendo, assim, o momento correto para troca ou purificação do fluido utilizado, ou ainda a purificação do fluido novo antes de efetuar o primeiro enchimento no produto (Mobley, 1990).

Atualmente, o método mais utilizado para indicar o número de partículas sólidas contaminantes numa amostra de fluido hidráulico é especificado na norma ISO 4406. Essa norma tem por objetivo a classificação da quantidade de partículas por faixas de tamanho, sendo que a quantidade varia de 0,01 a 2.500.000 partículas por mililitro de óleo. Para cada faixa é determinado um número de escala ou código, construído pela combinação de números que representam o número de partículas iguais e maiores que um determinado tamanho em 1ml de óleo, conforme a Tabela 1.

Observa-se que o número de escala aumenta uma unidade por cada duplicação de quantidade de partículas. O método de representar os dados de contagem de partículas foi concebido para minimizar as confusões geradas por outros métodos. O código ISO 4406 de limpeza, utilizado até antes da publicação de 1999, tomava com base a contagem de partículas por unidade de volume de tamanhos, maiores que $5\mu\text{m}$ e $15\mu\text{m}$. Essas dimensões foram selecionadas devido ao fato de que, estatisticamente, a maioria das partículas abrasivas duras, de tamanho em torno de $5\mu\text{m}$, tem uma relação aparente (relação longitude sobre largura) aproximando-se da unidade, e as partículas de tamanhos maiores de $15\mu\text{m}$ não excedem uma relação de aspecto aparente de 3. O tamanho $5\mu\text{m}$ foi considerado indicador dos pequenos sedimentos no fluido, e as de $15\mu\text{m}$ representam a presença de partículas que originam o desencadeamento do desgaste. Assim, a ISO 4406 classifica o nível de limpeza do fluido com a utilização de dois códigos. Como exemplo, ISO Y/Z, onde Y representa a quantidade de partículas maiores ou iguais que $5\mu\text{m}$ e Z representa a quantidade de partículas maiores ou iguais que $15\mu\text{m}$. Num código ISO16/13, significa que o fluido contém entre 320 e 640 partículas

maiores e iguais que 5µm, e entre 40 e 80 partículas maiores e iguais que 15µm, por um mililitro de fluido (ISO 4406-1999).

Tabela 1 - Código do Nível de Contaminação

Número de escala	Número de Partículas por Mililitro de Fluido	
Código ISO	Maior que	Até e Incluso
28	1300000	2500000
27	640000	1300000
26	320000	640000
25	160000	320000
24	80000	160000
23	40000	80000
22	20000	40000
21	10000	20000
20	5000	10000
19	2500	5000
18	1300	2500
17	640	1300
16	320	640
15	160	320
14	80	160
13	40	80
12	20	40
11	10	20
10	5	10
9	2.5	5
8	1.3	2.5
7	.64	1.3
6	.32	.64
5	.16	.32
4	.08	.16
3	.04	.08
2	.02	.04
1	.01	.02

Fonte: ISO 4406 (1999)

A partir dos anos 70, com o avanço tecnológico, partículas menores que 5µm começaram a ser identificadas como causadoras de desgastes em

sistemas mais críticos, como sistemas de alta pressão com servo-válvulas, robótica, válvulas proporcionais e outros. Alguns fabricantes de filtros e de sistemas hidráulicos têm solicitado a adição de uma terceira medição, 2µm e maiores, para indicar o nível de contaminantes de menor tamanho; assim, a classificação de limpeza do fluido seria ISOX/Y/Z, que significa a medição de partículas maiores que 2µm, 5µm e 15µm por mililitro de fluido. Em 1992, o pó utilizado para teste e calibração de contadores automáticos de partículas ACFTD (*Air Cleaner Fine Test Dust*) da *AC Spark Plug Division*, posteriormente *AC Rochester Division da General Motors Co.*, teve sua fabricação descontinuada. A partir daquela data, a ISO iniciou esforços para encontrar uma alternativa que a substituísse. A ISO solicitou ao NIST (*National Institute of Standards and Technology*) que desenvolvesse uma nova poeira em substituição ao ACFTD. A nova poeira desenvolvida foi denominada ISO MTD (*ISO Medium Test Dust*), sendo fabricada pela PTI (*Powder Technology Inc.*). O material padronizado pela ISO MTD é similar à ACFTD, porém produzido com uma distribuição padrão e rigorosos procedimentos de controle de qualidade, assegurando, dessa forma, excelente repetibilidade. Para essa nova distribuição do tamanho de partículas de poeira, foram utilizados modernos microscópios eletrônicos, além de técnicas sofisticadas de análises de imagens.

Constatou-se, assim, um desvio muito grande entre o novo fluido de calibração ISO MTD e o ACFTD em relação à quantidade e tamanhos de partículas, pelo fato de o ACFTD ter utilizado em sua contagem uma tecnologia ultrapassada, como, por exemplo, microscópio óptico. Com o intuito de preservar os dados obtidos anteriormente por meio de contagem de partículas, a ISO direcionou as alterações e adaptações na norma para que o impacto causado fosse o mínimo possível. Dentre as principais adaptações, as mais importantes são:

- A ISO 4406 passa a ser denominada ISO 4406:1999;
- A alteração da norma de calibração de contadores de partículas de ISO 4402 para ISO 11171;
- Como forma de distinguir o uso da nova norma com relação a anterior, foi adicionado um símbolo "c" na nomenclatura correspondente ao tamanho da partícula. Assim, todos os Contadores Automáticos de

Partículas calibrados pela ISO 11171 receberão o símbolo “c” em seu visor digital, como sinal dessa alteração;

- Para os Contadores Automáticos de Partículas, o código de limpeza usará três dígitos correspondentes à concentração de partículas de tamanho maior ou igual a 4µm, 6µm e 14µm (c), que correspondem respectivamente aos tamanhos 2µm, 5µm e 15µm utilizados anteriormente;
- Essa nova classificação de tamanhos de partículas terá impacto sobre a eficiência dos elementos filtrantes.

A contagem de partículas pode ser efetuada de duas formas distintas, ou seja, através de contagem manual (óptica) e através da utilização de Contadores Automáticos de Partículas (Bensch, 2000).

Além da classificação ISO para a quantidade de partículas, também a SAE (*Society of Automotive Engineers*) define o nível de contaminantes em sistemas hidráulicos através de código NAS (*National Academy of Sciences*), de acordo com a norma NAS1638 (Requerimento de limpeza de fluidos de sistemas hidráulicos). A Tabela 2 define a classificação NAS. A quantidade de partículas reportada em cada um dos códigos NAS é referente a um volume de 100ml de fluido.

Tabela 2 – Classe de Limpeza NAS4059

Tamanho/ µm	000	00	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
>2	164	328	656	1310	2620	5250	10500	21000	42000	83900	168000	336000	671000	1340000	2690000
>5	76	152	304	609	1220	2430	4860	9730	19500	38900	77900	156000	311000	623000	1250000
>15	14	27	54	109	217	432	864	1730	3460	6920	13900	27700	55400	111000	222000
>25	3	5	10	20	39	76	152	306	612	1220	2450	4900	9800	19600	39200
>50	1	1	2	4	7	13	26	53	106	212	424	848	1700	3390	6780

Fonte: AS4059- Cleanliness Classification for Hydraulic Fluids (1995)

Em ambas as normas de classificação da quantidade por tamanho de partículas, ISO e SAE, a medição de partículas dos contaminantes no fluido se dá de forma acumulativa. Considerando a classe de limpeza NAS 1, o volume de partículas presentes no fluido é interpretado da seguinte forma: a quantidade de partículas maior que 50µm é igual a 4, a quantidade de partículas maior que 25µm é igual a 20 (16 partículas de tamanhos entre 25µm

à 50µm e 4 partículas maiores que 50µm), a quantidade de partículas maior que 15µm é igual a 109 (89 partículas de tamanhos entre 15µm à 25µm, 16 partículas de tamanhos entre 25µm à 50µm e 4 partículas maiores que 50µm), a quantidade de partículas maior que 5µm é igual a 609 (500 partículas de tamanhos entre 5µm à 15µm, 89 partículas de tamanhos entre 15µm à 25µm, 16 partículas de tamanhos entre 25µm à 50µm e 4 partículas maiores que 50µm) e a quantidade de partículas maior que 2µm é igual a 1310 (701 partículas de tamanhos entre 2µm à 5µm, 500 partículas de tamanhos entre 5µm à 15µm, 89 partículas de tamanhos entre 15µm à 25µm, 16 partículas de tamanhos entre 25µm à 50µm e 4 partículas maiores que 50µm).

Uma concentração de partículas contaminantes muito alta ou uma viscosidade alta poderão saturar o contador automático de partículas; então, faz-se necessário diluir a amostra do fluido. A diluição deve ser realizada com muita cautela. O fluido utilizado para a diluição tem de estar muito limpo, classe 0 ou melhor, e também deve ser compatível com o fluido sob análise e com o fluido usado para a calibração dos contadores automáticos de partículas (Aerospace Standard AS 4059B,1995).

1.4.5.1 Determinação de quantidade de partículas por contagem óptica

A contagem óptica de quantidade de partículas é efetuada a partir da filtragem do fluido em membranas filtrantes de alta eficiência de filtragem, utilizando-se, em geral, membranas com capacidade de retenção em torno de 0,2µm. O importante, neste processo bem como em outros, são a representatividade e a consistência da amostra. Tal cuidado deve ser tomado na fase da coleta, homogeneização e preparação da amostra. A análise consiste em filtrar um volume conhecido de fluido, similar ao processo do teste gravimétrico, sendo que, em vez de pesar a amostra, esta é levada a um microscópico eletrônico, no qual se faz a contagem das partículas concentradas na superfície da membrana filtrante. O resultado da contagem é expresso de acordo com a norma ISO 4406 ou 4406:1999, levando-se em consideração o volume de 1ml de fluido. Esse tipo de contagem fornece dados precisos de distribuição de tamanho e quantidade. O maior agravante desse

processo é o tempo despendido para a preparação e análise da amostra de fluido (Pall, 1990).

1.4.5.2 Determinação de quantidade de partículas através de contadores automáticos de partículas

O uso crescente de contadores automáticos de partículas tem facilitado bastante as atividades das empresas e laboratórios que necessitam obter resultados rápidos e precisos relativos à limpeza de fluidos.

No entanto, este processo requer alguns cuidados especiais. Embora a concepção do equipamento seja somente para a leitura de partículas sólidas, estudos demonstraram que a contagem pode ser afetada pela presença de água livre, bolhas de ar e, em alguns casos, pela própria aditivação do fluido. O princípio básico de funcionamento desse equipamento está relacionado a uma fonte de luz *laser* ou mesmo infravermelho, um espelho e um detector eletrônico. A fonte envia luz através da lente, que por sua vez converge essa luz branda em um feixe de luz focado em um ponto específico. Transversalmente a esse feixe de luz, existe um fluxo de fluido se deslocando como uma vazão constante. Quando uma partícula o atravessa, o fluxo é parcialmente interrompido, formando-se um sombreamento sobre o sensor, sinal este captado eletronicamente. Dessa forma, consegue-se determinar o tamanho e a quantidade de partículas contidas na amostra do fluido. A Figura 5 ilustra esta explicação.

Figura 5 – Princípio de funcionamento de um contador de partículas
Fonte: Caterpillar Hydraulic System Management Guide (1999)

Assim, é possível entender por que a água livre e as bolhas de ar influenciam na contagem das amostras, embora não sejam partículas sólidas. Ao passarem pelo feixe de luz, produzirão o mesmo efeito que as sólidas, ou seja, obstruirão parcialmente o feixe de luz, fazendo um sombreamento sobre o sensor. Para minimizar os efeitos das bolhas de ar na contagem de partículas, durante a preparação da amostra, faz-se um aquecimento da amostra do fluido para diminuição da viscosidade, seguido de uma agitação leve para sua homogeneização. Completando o ciclo, utiliza-se uma bomba de vácuo ou mesmo um banho sônico para expulsar as bolhas de ar presentes no fluido. Os resultados das análises de fluidos são reportados com base na norma ISO 4406 (Pall, 1990).

Os contadores de partículas são configurados atualmente em duas versões distintas: o tipo de laboratório que faz a contagem de partículas em amostras de fluidos coletados em garrafa, cuja amostra de fluido é retirada e enviada para o equipamento através de uma bomba de vácuo; o outro é o tipo portátil, também conhecido como equipamento para medição em linha (*on-line*), que é um equipamento utilizado para análise de campo, sendo instalado em algum ponto de turbulência da linha de pressão do sistema hidráulico, usando a própria pressão do sistema para conduzir o fluido para medição (Csikai, 1987).

1.5 Controle por remoção de contaminantes

É impossível excluir toda a contaminação existente em um sistema de fluidos. Previsões podem ser feitas para remover uma boa parte dos contaminantes que são adicionados ou mesmo gerados internamente. O objetivo é manter a contaminação do fluido em um nível aceitável. Para isso, é necessário um sistema de filtragem adequada. Como parte do projeto do produto, existem duas considerações principais que predominam: a localização do filtro e a seleção do tipo de filtro (Norvelle, 1984).

O bom desempenho de um sistema hidráulico pode estar diretamente relacionado com o desempenho da filtração do fluido. Essa filtração em um sistema hidráulico tem um papel fundamental, que é a de proteção às folgas dos componentes hidráulicos, e também a de garantir a lubrificação entre as

partes em contato. A figura 6 ilustra uma partícula alojada entre uma esfera e o anel interno dificultando a lubrificação.

Com relação às folgas, significa filtrar os tamanhos de partículas do mesmo tamanho das folgas que existem entre os componentes rotativos ou deslizantes de um sistema de transmissão. Essa proteção está relacionada com a localização do filtro no sistema hidráulico e com a eficiência de filtragem dos elementos filtrantes.

Figura 6 – Desgaste em rolamento provocado por contaminação

Fonte: Caterpillar Hydraulic System Management Guide (1999)

Os filtros devem estar dimensionados para garantir a proteção às folgas e, ao mesmo tempo, manter a máxima eficiência durante seu funcionamento. A localização do filtro depende da razão de sua inclusão no sistema hidráulico. Assim, se o motivo de sua instalação é para dar proteção à folga de algum componente específico, sua melhor localização é o mais próximo possível do componente. Se o filtro é selecionado para controlar o nível de contaminação em geral, pode ser instalado na linha de fluxo principal ou ainda na linha de retorno (Norvelle, 1984).

Podem existir casos em que se faça necessária uma combinação de filtração, ou seja, determina-se um filtro para controle geral da contaminação e um filtro adicional para dar proteção à folga de algum componente mais crítico. A localização dos filtros em um sistema hidráulico pode ser a mais variada possível, sendo as mais utilizadas:

a) filtro de sucção, instalado na tubulação de entrada (sucção) de fluido para a bomba: é utilizado para proteger a bomba contra as partículas de

tamanho crítico, já que a bomba é um dos componentes mais sensíveis à contaminação. No entanto, o mau dimensionamento desse filtro poderá restringir o fluxo do fluido para a bomba e acarretar numa cavitação desta, acelerando o processo de desgaste da bomba;

b) filtro de linha de pressão que, instalado nessa linha, deve resistir à pressão de trabalho do sistema, e é considerado uma forma positiva de proteger os componentes específicos do sistema. Uma vantagem deste tipo de instalação de filtro é que a perda de pressão, através do elemento, é menos crítica do que nos filtros de sucção e retorno. Por outro lado, está normalmente sujeito a vibrações e picos de pressão, que podem afetar o elemento, que é geralmente fabricado para alto colapso, tornando o seu custo maior em relação aos demais filtros;

c) filtros de linha de retorno, que são unidades de baixa pressão e que devem ser dimensionados com a superfície filtrante suficiente para evitar a formação de contrapressões elevadas. São aceitos como uma solução eficiente e mais econômica para um adequado controle de contaminação no sistema hidráulico, uma vez que, em função de sua localização, conseguem remover parte dos contaminantes gerados pelos componentes internos, bem como aqueles que ingressaram no sistema pelas vedações ou hastes dos cilindros, mantendo um fluido mais limpo no reservatório e, conseqüentemente, proporcionando uma certa proteção à bomba hidráulica;

d) filtros de reservatório: o método preferido para encher o sistema com fluido é o de pré-filtração, de modo a evitar a contaminação do fluido através de fontes externas ao sistema. Isso pode ser feito de diversas maneiras, como, por exemplo, encher o sistema utilizando o filtro da linha de retorno, um filtro de um sistema de filtragem em paralelo ou uma unidade portátil de enchimento do filtro;

e) filtro de última chance, que não são filtros selecionados para controlar partículas pequenas na faixa da espessura do filme lubrificante. São, na verdade, filtros relativamente grossos, dos quais se espera que durem por toda a vida útil do sistema ou pelo menos o intervalo de tempo recomendado entre as revisões completas.

Além das localizações já mencionadas, existe um tipo de filtração completamente independente do sistema hidráulico, a filtração em paralelo,

também conhecida como *off-line* ou *kidney loop*. Não oferece proteção direta aos componentes do sistema, porque este possui o seu próprio sistema de bombeamento e filtragem; no entanto, apresenta suas vantagens, como, por exemplo, os filtros não estão sujeitos à pressão extrema, podendo permanecer em funcionamento mesmo enquanto o sistema hidráulico principal permanecer inoperante, e os elementos filtrantes podem ser substituídos mesmo com o sistema hidráulico principal em operação (Norvelle, 1984).

O desenvolvimento de métodos para investigação do desempenho do controle de contaminação de sistemas de fluido tem trazido a necessidade de estimativa realística da taxa de ingresso de contaminantes durante operação no campo. Existem duas razões para explicar as discrepâncias entre a taxa de ingresso de contaminação do campo calculada por contador automático de partículas e a informação da eficiência dos filtros. As duas condições investigadas foram a condição de vazão dinâmica e o vazamento pelo sistema de alívio *bypass* do filtro. O efeito da condição da taxa dinâmica é mais baixo que a efetiva taxa de filtração do elemento de filtro. Essa baixa taxa de filtração está relacionada com a vedação imprópria do elemento filtrante, o elemento danificado, e a vazão da válvula de alívio, que também reduz a eficiência do filtro.

As taxas de ingressos de contaminantes são determinadas pelos modelos apresentados a seguir, e que são utilizados para prover a “melhor estimativa” da distribuição do tamanho de partículas da média atual da taxa de ingresso. Para o sistema 1, é considerado um sistema de transmissão de força simples, como mostra a Figura 7.

Duas partes de informações são necessárias para calcular a taxa média de ingresso no sistema: a contagem de partículas, dando a distribuição do tamanho das partículas contaminantes no sistema de fluidos, e os dados de eficiência dos filtros. A equação (King, R. K.; Tessmann, R.K.; Bensch, L.E. - 1976) diferencial que descreve o processo de filtração para um sistema simples é :

$$\frac{dNd}{dt} + \left(\frac{\beta\mu - 1}{\beta\mu} \right) \frac{Q}{VN\mu} = \frac{R}{\beta\mu V} \quad (1)$$

onde:

$N_d = N_u / \beta$ = Concentração acumulativa de partículas maior que o tamanho especificado por unidade de volume de fluido no ponto de saída do filtro.

N_u / β = Relação entre a quantidade acumulativa de partículas e a taxa de filtração

Figura 7 –Curvas de distribuição de contaminantes e diagrama esquemático para um sistema de duas máquinas

Fonte: KING, R. K.; TESSMANN, R.K.; BENSCH, L.E. (1976)

$\beta = N_u / N_d$ = Taxa de filtração de partículas maior que um tamanho específico

Q = Vazão através do filtro

V	=	Volume de fluido circulando no sistema
R	=	Taxa de ingresso de partículas maior que um tamanho específico por unidade de tempo

Esta equação pode ser solucionada através da expressão para um valor estável do nível de contaminação.

$$N\mu = \frac{\beta R}{(\beta - 1)Q} \quad (2)$$

podendo ser resolvida pela taxa de ingresso, R.

$$R = \frac{(\beta - 1)QN\mu}{\beta} \quad (3)$$

A Figura 7 refere-se à contagem de partículas de duas máquinas com sistema do tipo 1, A e B. Observa-se que as curvas de distribuição de contagem de partículas são quase linhas retas, o que significa um sistema funcionando de maneira correta, sem vazamento significativo na válvula de alívio e sem influência da vazão. Isso também proverá aumento do nível de confiança da acuracidade das informações do contador de partículas.

O sistema 2 é mais complexo que o sistema 1, pois contém dois circuitos, duas bombas e dois filtros idênticos. A equação diferencial que descreve as características da contaminação do sistema 2 é:

$$\frac{dNR}{dt} = \frac{R}{V} + \frac{N_1 Q_1}{V} + \frac{N_2 Q_2}{V} - \frac{NR(Q_1 + Q_2)}{R} \quad (4)$$

onde N_1 , N_2 , Q_1 , e Q_2 , são definidos no diagrama esquemático da Figura 8.

Substituindo-se N_R/β por N_1 e N_R/β^2 por N_2 , a solução da equação (4) é obtida por:

$$NR = \frac{R}{(1 - \frac{1}{\beta})Q_1 + (1 - \frac{1}{\beta^2})Q_2} \quad (5)$$

Expressando em termos de N_1 e resolvendo por R:

$$R = N_1 \left[(\beta - 1)Q_1 + (\beta - \frac{1}{\beta})Q_2 \right] \quad (6)$$

A Figura 8 representa a informação de contagem de partículas para a máquina C. A distribuição para esse caso não se aproxima de uma linha reta, como foi o caso do sistema 1, mas apresenta uma curva significativa.

A válvula de alívio tem sido responsável por modificar a relação dos dados de filtragem, refletindo-se na eficiência da filtração, que ocorre quando o fluido não passa pelo filtro, mas sim pela válvula de alívio. Para estabelecer a medição do vazamento, é necessário definir como o valor será determinado ou assumido da porção total de vazão que é capaz de passar pela válvula, expressa como percentual de vazamento. Em alguns sistemas de fluidos, o vazamento através das válvulas pode exceder a 40% do total do sistema de vazão (Tessman, 1976).

Figura 8 – Curva de distribuição de contaminantes e diagrama esquemático para dois sistemas de uma máquina

Fonte: Fonte: KING, R. K.; TESSMANN, R.K.; BENSCH, L.E. (1976)

Os filtros necessários para atingir excelentes níveis de limpeza, na maioria dos fluidos hidráulicos, devem ser os de filtragem absoluta, de alta eficiência de remoção de partículas, na faixa de aproximadamente $2\mu\text{m}$ de tamanho. A filtração dos líquidos, nessa faixa de tamanho, já é comum nas indústrias farmacêutica e eletrônica, com divulgação também já difundida para sistemas hidráulicos e lubrificação. Para controlar a deterioração por desgaste dos componentes, os filtros principais do sistema devem remover a maior quantidade possível de partículas iguais ou maiores que a espessura do filme de lubrificante entre as partes móveis dos componentes dos sistemas hidráulicos (Pall, 1990). A substituição do ACFTD (ISO 4572) pelo ISO MTD (ISO 16889), também afetou os testes de desempenho e eficiência dos filtros hidráulicos. Dependendo do filtro em questão, a capacidade de retenção de sujeira pode ter sido afetada. Os testes realizados de acordo a ISO TC131/SC8/WG9 obtiveram o desempenho de oito tipos diferentes de filtros. Os resultados obtidos estão sumarizados na Tabela 3. A capacidade de retenção pode ser maior ou menor com ISO MTD, dependendo do filtro específico testado. Dentro de um extremo, os resultados com ISO MTD variaram de mais (+)27% a menos (-)14%, comparando com resultados correspondentes ao ACFTD. Por causa dos tipos de resposta diferentes, não é possível assumir uma correlação para converter capacidade de retenção ACFTD para capacidade ISO MTD. Um estudo de teste de desempenho ISO MTD tem de ser conduzido.

O aumento ou diminuição da capacidade de retenção de partículas não significa que o filtro terá sua vida útil diminuída ou aumentada. A vida útil do filtro depende de uma série de variáveis, incluindo o tipo de contaminação a que está exposto.

A capacidade de retenção de sujeira, eficiência do filtro, definida como razão beta (β), é afetada por modificações nos procedimentos de testes dos filtros e também por modificações do método de calibração dos contadores automáticos de partículas.

O tamanho e a concentração de partículas são importantes para o controle de contaminação. Com a modificação do método de calibração, imediatamente foram modificados os tamanhos e concentrações de partículas.

Tabela 3 – Impacto do teste de poeira sobre a capacidade de retenção e taxa beta dos filtros

Filtro Testado	Alteração em capacidade com ISO MTD (%)	Tamanho da Partícula com calibração indicada (µm)		Razão Beta usando indicador de teste de sujeira	
		ISO 4402	ISO 11171	ACFTD	ISO MTD
1	+ 14	1	4.2	33	76
2	-11	2	4.6	16	22
3	+13	2	4.6	42	112
4	+27	2	4.6	10	33
5	-14	10	9.8	13	12
6	-7	10	9.8	7.5	7.4
7	0	10	9.8	2.5	4.5
8	-2	15	13.6	5.9	9.1

Fonte: Verdegan, B.M. (1998)

A mudança do tamanho ACFTD (ISO 4402) para o tamanho NIST (ISO 11171) afetou principalmente os tamanhos de partículas menores. A razão beta obtida através do uso da norma ISO 16889, usando o novo método de calibração, será reportado na forma $\beta_{X(c)} = Y$, onde $X(c)$ refere-se ao tamanho de partícula (usando ISO 11171) e Y refere-se ao valor da razão de filtragem (beta). A Tabela 4 mostra a conversão do tamanho ACFTD para o tamanho NIST (ISO 11171, 2001).

A Tabela 4 deverá ser utilizada como um guia geral, mas a relação exata entre tamanho ACFTD e NIST pode variar entre os laboratórios, dependendo dos contadores automáticos de partículas, da corrida do ACFTD usado e da acuracidade da calibração original do ACFTD (Verdegan, 1998).

A classificação de um filtro como nominal e absoluto é freqüentemente mal interpretada e seu conceito utilizado de forma imprópria. As partículas grandes que passam pelo filtro absoluto não estão relacionadas com a abertura média da malha do elemento filtrante. A captura dessas partículas está relacionada com o potencial zeta, que está diretamente relacionado com a interação da condição da carga eletrostática das partículas, do fluido e do meio

usado como material filtrante. Qualquer modificação num desses fatores afetará as condições de filtragem e, conseqüentemente, a distribuição das partículas no fluido na saída do elemento filtrante (Juhasz, 1983).

Tabela 4 – Convertendo tamanho de partículas ACFTD para tamanho de partículas Nist

ACFTD size (ISO 4402)	NIST size (ISO 11171)
μm	$\mu\text{m(c)}$
1	4.2
2	4.6
3	5.1
5	6.4
7	7.7
10	9.8
15	13.6
20	17.5
25	21.2
30	24.9
40	31.7

Fonte: ISO 11171- Particle size Obtained Using (2001)

A partir de uma classificação $\beta=75$ o elemento filtrante é considerado absoluto. Isso significa que quanto maior o β , maior será a capacidade de retenção de partículas pelo mesmo. A Tabela 5 mostra a relação β *versus* eficiência de filtragem. Interpretando-se a tabela, o $\beta_x=100$ significa que 99% das partículas de tamanho x serão retidas pelo elemento de filtro; conseqüentemente, 1% das partículas segue pelo sistema de fluido depois de passar pelo elemento. Assim, é importante ressaltar que nem todas as partículas serão retidas em uma única passagem do fluido pelo elemento filtrante. Partículas maiores ou menores em relação à capacidade de retenção do elemento filtrante passarão pela malha filtrante e irão para dentro do sistema de transmissão por fluido. (Hartsuch, 1997).

Tabela 5 – Eficiência de filtração de elementos de filtros

Beta _x	%eficiência $[(\text{beta}_x - 1) / \text{beta}_x] \times 100$
1	00.0
2	50.0
5	80.0
10	90.0
20	95.0
75	98.7
100	99.0
200	99.5
1000	99.9
5000	99.98

Fonte: HARTSUCH, Paul (1997)

1.6 Contaminantes gerados pelo desgaste interno de componentes

O desgaste natural dos componentes internos de um sistema hidráulico, produzido pela fricção e desgaste das superfícies deslizantes em contato com todas as partes móveis dentro do sistema, também é considerado uma fonte de contaminação. O desgaste pode ser maior ou menor, dependendo do ajuste entre os componentes e do tipo de lubrificação aplicada no sistema. A lubrificação tem por objetivo a redução do atrito entre duas superfícies em movimento relativo, por meio de introdução de substâncias entre as superfícies. A lubrificação mais usual é com líquidos do tipo óleo mineral de petróleo. A espessura do fluido entre as superfícies em movimento deve ser superior à soma das distâncias das mesmas.

Dentre os tipos de lubrificação, as mais utilizadas são:

a) a hidrodinâmica, que possui uma película de lubrificação em torno de 2µm e pressão de aproximadamente 50000PSI, não ocorrendo deformação da superfície de contato. Assim o desgaste e a geração de partículas é desprezível se as partículas forem menores que a espessura do filme, porém haverá um aumento da temperatura e posterior cisalhamento que darão origem

a baixa viscosidade, diminuição da película e decomposição do fluido, gerando abrasão dos componentes metálicos;

b) a lubrificação elasto-hidrodinâmica, que possui uma película de lubrificação entre $0,05\mu\text{m}$ e $2\mu\text{m}$ e pressão de aproximadamente 350000PSI, ocorrendo, dessa forma, uma considerável deformação elástica das superfícies lubrificadas e geração de calor. Devido às altas pressões do sistema, as partículas podem ser “encravadas” nas superfícies. Assim a alta pressão, deformação das superfícies e a geração de calor resultam num aumento de viscosidade (em função da pressão) e contato de asperezas. Este fato tem como conseqüências, a abrasão e fadiga das superfícies e a lubrificação tipo camada limite, que possui uma película de lubrificação na faixa de $0,001\mu\text{m}$ a $0,05\mu\text{m}$, possui baixa velocidade e alta pressão entre as superfícies de contato, expulsando a película de lubrificação para fora da zona de contato. Assim, mesmo partículas “hiperfinas” poderão causar danos às superfícies de contato, trazendo problemas de alta carga e alta temperatura nas superfícies lubrificadas, originando uma camada fina de película de lubrificação e contato de asperezas, que ocasionam abrasão e adesão às superfícies lubrificadas (Pall, 1990).

1.7 Contaminantes incorporados devido à degradação do fluido dentro do sistema hidráulico

Segundo Booser (1994), o uso de fluidos incompatíveis com sistemas hidráulicos poderá ocasionar uma reação química entre o fluido e as vedações do sistema hidráulico, gerando partículas em excesso dentro do sistema. A formulação do fluido deverá ser muito bem balanceada para que haja uma homogeneização perfeita entre o óleo base e o pacote de aditivos; o desbalanceamento da formulação do óleo acarretará a quebra da estabilidade da cadeia, tendo como conseqüência o aumento na acidez e variação da viscosidade dos fluidos e a inibição do funcionamento dos aditivos, principalmente os dispersantes e detergentes, ocasionando a formação de lodo dentro do sistema.

A mistura de diferentes fluidos, dentro de um sistema hidráulico, com diferentes características de aplicação, também poderá resultar em uma reação química e uma posterior degradação do fluido. Um outro fator que pode caracterizar a degradação de um fluido é a má aplicação dos fluidos e sua utilização além do limite de vida útil estabelecido pelo fabricante sem algum tipo de controle.

1.8 Efeitos da contaminação em sistemas hidráulicos

O formato e o tipo de material proporcionam um maior impacto sobre os danos de uma superfície, principalmente quando se trata de partículas muito duras. Partículas fáceis de serem quebradas em muitas outras menores causam menos danos à superfície. No primeiro impacto, elas podem gerar danos, após o que se quebram e acabam se moldando à superfície. O maior impacto será quando a partícula causar uma fadiga na superfície. Um exemplo disso é a sílica remanescente do processo de fundição. A combinação desse tipo de contaminante em grandes concentrações e com o sistema hidráulico pressurizado fará com que a superfície seja atacada e danificada.

Figura 9 – Depressão produzida por ataque de partículas
Fonte: NIXON H. P.; COGDELL J.D. (1998)

A Figura 9 mostra essa condição. A dureza e a ductibilidade de partículas irão determinar a profundidade e o tamanho da depressão causada pelo ingresso de partículas dentro do sistema em funcionamento.

Como resultado desse processo, as propriedades das partículas de sujeira podem ter a maior influência sobre os danos nas superfícies dos componentes dos sistemas de fluidos. Isso evidencia que apenas conhecer o tamanho e o nível de concentração das partículas de contaminação não é o suficiente para correlacionar a severidade dos danos que estas podem causar ao sistema. Dessa forma, é fundamental conhecer também, e com mais detalhes, as características e propriedades das partículas contaminantes (Nixon, 1998).

A falha final é normalmente resultado da interação de múltiplos mecanismos de desgaste acionado por condições específicas de operação, podendo ser classificada como simples ou catastrófica. A catastrófica é considerada a falha mais inconveniente em sistemas hidráulicos, pois, quando de sua ocorrência, são necessários muitos dias, ou até mesmo semanas, para corrigir a falha e descontaminação de todo o sistema hidráulico, além do alto custo de reposição dos componentes. Um exemplo típico desse tipo de falha é a quebra de uma bomba hidráulica.

Os efeitos negativos da contaminação em sistemas hidráulicos podem se manifestar como falhas durante as primeiras horas de operação do sistema ou durante sua vida útil. Quanto ao período de ocorrência, as falhas podem ser classificadas como de curto prazo, ou prematuras, e de longo prazo (Sulpice, 1994).

1.8.1 Falhas prematuras

Segundo Park (1997), esse tipo de falha poderá ocorrer em qualquer sistema hidráulico, mas é mais freqüente em sistemas hidráulicos equipados com servo-válvulas e válvulas de controle proporcional. Modernos sistemas de controle hidráulicos estão requerendo o uso crescente de servo-válvulas e válvulas de controle proporcional. Estes componentes são considerados um

estágio crítico para controle do processo industrial e a qualidade do produto final.

Válvulas de controle proporcional também são encontradas em funções subordinadas para o manuseio de materiais, em que o tempo é essencial. O fracasso ou a falha dessas válvulas de controle causará perda muito cara de produção, sendo esta muitas vezes mais que o custo de prevenção. Servo-válvulas hidráulicas se tornaram extensamente usadas, primeiramente em aeronaves e em aplicações de pilotos automáticos de mísseis, melhorando a estabilidade de controle de vôo e guia de sistemas de mísseis, porém o sucesso nessas aplicações exigiu que os fabricantes melhorassem seu desempenho e confiabilidade, principalmente no que se diz respeito às falhas por contaminação dos fluidos de transmissão de força. As aplicações industriais e automotivas para servo-válvulas foram implementadas posteriormente a essa etapa.

Estas são freqüentemente falhas de impossível predição, devido às suas características particulares. Esmagamento de partículas em um carretel e entupimento de um orifício de passagem de fluido hidráulico são consideradas as falhas mais comuns e que resultam em movimentos descontrolados dos atuadores das válvulas. Além de causar sérios danos ao equipamento, a falha também conduzirá a uma parada não planejada da produção. Os mecanismos típicos da falha prematura são abordados a seguir.

1.8.1.1 Esmagamento de partículas

Segundo Park (1997), quando partículas sólidas do mesmo tamanho que as folgas se alojam entre o carretel e o corpo de uma válvula, as partículas podem bloquear o orifício de controle, causando resistência ao deslocamento do carretel e queda de pressão do controle. Essas mesmas partículas aumentam a fricção quando a válvula é acionada conforme pode ser observado na Figura 10.

O desbalanceamento do carretel em relação ao conjunto de válvula também pode ser atribuído a esse processo. Será necessária uma força adicional para movimentar o carretel, porém é muito difícil quantificar a

magnitude da força necessária para vencer o bloqueio imposto pelos contaminantes.

Figura 10 – Desempenho de válvula hidráulica reduzida por contaminação
 Fonte: Caterpillar Hydraulic System Management Guide (1999)

As cargas laterais causam adesão microscópica (soldadura fria) entre as superfícies de contato de metal do carretel e corpo. O reflexo dessa falha prematura nos sistemas hidráulicos é a hesitação do comando, que faz com que ocorram trancos durante o funcionamento do sistema, ou ainda um sistema que não para imediatamente após a solicitação de parada, ocasionando uma dificuldade de posicionamento. A ilustração desse tipo de falha está demonstrada na Figura 11.

Figura 11 - Diminuição da força do carretel por esmagamento

Fonte: PARK, R. W. (1997)

1.8.1.2 Obstrução do orifício de passagem do fluido

Este fenômeno acontece com qualquer válvula do tipo carretel. O mesmo se dá entre o carretel e o corpo de uma válvula quando o conjunto se encontra em estado estacionário e pressurizado. Partículas grandes se depositam nas folgas radiais e impossibilitam a passagem de óleo pelo orifício das válvulas. O tempo de resposta do solenóide é aumentado e as válvulas ficam instáveis em função de um histerese mais largo e, em alguns casos mais severos. Nesse caso a válvula pode ser danificada, tornando-se inoperante. Sobre as partículas que se encontram depositadas nas folgas de um carretel estático e expostas a uma alta pressão de trabalho, ocorre um aumento gradual do volume de contaminantes, na forma de lodo, que pode fechar o carretel dentro de 5 a 10 minutos. A ilustração desse tipo de falha está demonstrada na Figura 12 (Park,1997).

Figura 12 - Diminuição da força do carretel por entupimento
 Fonte: PARK, R. W. (1997)

1.8.2 Falhas de longo prazo

As falhas por entupimento e esmagamento já citadas anteriormente também podem se manifestar como falhas de longo prazo. No entanto, são abordadas nesta etapa as falhas ocasionadas por desgastes dos componentes internos dos sistemas hidráulicos, que geram contaminantes adicionais e aceleram os desgastes dos componentes. O desgaste é a danificação de uma superfície sólida, envolvendo uma perda progressiva de material, em função do movimento relativo entre a superfície e as substâncias em contato com ela. A perda progressiva pode se dar através de um ataque químico, dissolvendo material da superfície, ou pela fratura da superfície. A seguir, destacam-se as principais categorias de desgaste.

1.8.2.1 Desgaste por erosão

Segundo Pall (1990), o desgaste por erosão é a perda progressiva do material original da superfície sólida devido à interação mecânica entre a superfície e o fluido ou uma corrente impactante de fluido. Os desgastes por erosão podem ser classificados como:

a) a erosão por impactação de partículas sólidas, que é a forma de erosão produzida por uma sucessão contínua de impactos de partículas sólidas sobre a superfície;

b) a erosão por cavitação, que é a perda progressiva de material de um sólido devido à ação de bolhas de ar em um líquido, que colapsam perto da superfície do sólido;

c) a erosão por lama, que é a perda progressiva de material de uma superfície sólida pela ação de uma mistura de partículas sólidas num líquido (lama) em movimento, em relação à superfície sólida;

d) a erosão por impactação de líquidos, que é a remoção progressiva de material de uma superfície sólida pela ação do choque de um fluido com a superfície sólida.

Esse tipo de desgaste, conforme ilustrado na Figura 13, é especialmente encontrado em componentes de sistemas hidráulicos com alta velocidade de fluxo do fluido como em servo-válvulas, válvulas proporcionais e válvulas de controle de pressão (Heilbrunn, 1993).

Figura 13 - Desgaste por erosão

Fonte: Heilbrunn G.D. (1993)

1.8.2.2 Desgaste por adesão

O desgaste por adesão é a perda progressiva de material das superfícies sólidas com movimentos relativos, ou é iniciado pela ligação

localizada entre as superfícies. Os desgastes por adesão podem ser classificados como:

a) roçadura oscilante, que é definida como o movimento oscilante de baixa amplitude entre duas superfícies sólidas e que ocorre normalmente entre partes que, supostamente, não deveriam ter movimentação;

b) desgaste adesivo, que é devido à ligação ou solda localizada entre superfícies sólidas em contato, levando à transferência de material entre as duas superfícies ou na perda de material em ambas as superfícies;

c) desgaste por seqüestro, que é a detenção do movimento relativo como resultado da fricção interfacial;

d) desgaste por asperezas de deformação, que é a danificação de uma ou ambas as superfícies deslizantes causadas pela deformação plástica de uma aparente área de contato, levando à formação de protuberâncias na superfície que interferem com o deslizamento;

e) desgaste por oxidação, que é caracterizado pela reação das superfícies deslizantes com o ambiente, formando películas de óxidos que se separam das superfícies e mantêm baixos os níveis de desgaste (Pall, 1990).

Figura 14 - Desgaste por adesão
Fonte: Heilbrunn G.D. (1993)

Quanto ao desgaste por adesão ilustrado na Figura 14, é muito comum sua ocorrência em equipamentos hidráulicos, dando-se devido às excessivas cargas, baixa velocidade e redução da viscosidade do fluido por contaminação com água e alta temperatura (Heilbrunn, 1993).

1.8.2.3 Desgaste por fadiga superficial

É a fratura do material de uma superfície sólida causada pela tensão cíclica produzida pela ação repetida de deslizar ou rolar sobre a superfície. Os desgastes provocados pela fadiga superficial podem ser classificados como:

- a) desgaste por picadas, que é a remoção, ou deslocamento, do material pela ação da fadiga que forma cavidades na superfície;
- b) desgaste por lascadura, que é caracterizado pela remoção de material da superfície em forma de lâminas;
- c) desgaste por impacto, que é a danificação e remoção de material pela ação da impactação repetitiva de duas superfícies;
- d) desgaste por malhado, que é caracterizado pela danificação de superfícies sólidas pelo impacto local repetitivo ou por aplicação de carga estática (Pall, 1990).

Os componentes mais afetados pela ação da fadiga, conforme ilustração da Figura 15, são os rolamentos, como os rolos, esferas e superfícies, devido a tensão causado pelo contato das superfícies com os contaminantes. (Heilbrunn, 1993).

Figura 15 - Desgaste por fadiga

Fonte: Heilbrunn G.D. (1993)

1.8.2.4 Desgaste por abrasão

Segundo Booser (1994), é o desgaste produzido por partículas duras ou protuberâncias forçadas contra e movendo-se ao longo da superfície sólida. O

desgaste abrasivo é um mecanismo primário de desgaste. As partículas entram nos espaços das folgas entre duas superfícies em movimento, encravam-se em uma delas e atuam como ferramentas cortantes, removendo o material da superfície oposta que esteja em contato.

O tamanho das partículas que causam maior dano são aquelas iguais à espessura da folga ou pouco maiores que esta. A maioria dos componentes hidráulicos tem folgas dinâmicas menores que $3\mu\text{m}$. Para proteger as superfícies opostas do desgaste e fadiga, deverão ser removidas as partículas de tamanho aproximado ao tamanho da folga. Os desgastes por abrasão podem ser classificados como:

a) abrasão por baixa solicitação, que é também conhecida como desgaste por raspado, sendo que baixa solicitação significa que as forças devem ser suficientemente baixas para não moer as partículas abrasivas;

b) abrasão por alta solicitação, que é caracterizada por um raspado com deformação plástica das superfícies das partículas prensadas;

c) abrasão por goivadura, que está relacionada com a remoção de materiais causada pela ação repetitiva de cargas compressivas de metal duro com a ocorrência de uma deformação plástica acoplada a uma remoção de cavaco;

d) desgaste por polimento, remoção progressiva não intencional de material de uma superfície pela ação de atrito de outros sólidos em condições tais que o material é removido sem raspaduras, fraturas ou deformações visíveis na superfície.

Os efeitos do desgaste abrasivo em um sistema hidráulico podem ocasionar na mudança de dimensões das folgas internas, vazamentos, geração de calor, perda de eficiência e geração de partículas, que é sinônimo de mais desgaste. A ilustração de desgaste por abrasão é demonstrada na Figura 16.

Quando um sistema de fluido se torna mais sofisticado, a contaminação provocada por desgaste se apresenta menos tolerável. Partículas são as maiores contribuintes para desgaste de componentes de um sistema. Logo, desde que nenhum sistema possa ser protegido contra partículas estranhas, é necessário projetar componentes menos sensíveis ao desgaste. Existem três relacionamentos entre dureza dos contaminantes e desgaste abrasivo dos materiais:

a) se a dureza do contaminante é muito maior do que a dureza da superfície desgastada, o desgaste não depende da diferença da dureza do abrasivo e aço;

b) se a dureza do contaminante e da superfície desgastada são compatíveis, o desgaste da superfície é uma função da dureza do contaminante;

c) se a dureza da superfície desgastada é maior que a dureza do abrasivo, a superfície sob desgaste terá uma resistência teórica infinita para esse contaminante abrasivo, em particular (Tessman pg76-30,1976).

Figura 16 - Abrasão por partículas do mesmo tamanho da folga

Fonte: BOOSER, E. Richard (1994)

Tomando-se como referência a Figura 17, a seguinte relação matemática pode ser descrita:

$$V = KWL \log (H_a/H_m)$$

Onde:

V = volume de sujeira de desgaste

K = constante

W = carga sobre a amostra

L = tamanho do desgaste

H_a = dureza efetiva do abrasivo

H_m = dureza do metal

Figura 17 –Relação entre o volume de abrasivo de desgaste e a taxa logarítmica da dureza do abrasivo para o metal

Fonte: GEISE D.K.S. ; TESSMANN R.K. (1976)

1.9 Desgaste característico dos componentes hidráulicos

Os principais componentes de um sistema hidráulico estão sujeitos à falha. Como referido anteriormente, a falha é o resultado de um desgaste inicialmente suave que, à medida que vai aumentando, proporciona alterações dimensionais e desalinhamento entre as superfícies. Para determinados componentes de sistemas hidráulicos, o desgaste é, muitas vezes, característico em função do tipo de solicitação e funcionamento dos componentes. Os desgastes característicos de diversos componentes, como:

bombas, motores, cilindros, válvulas e atuadores hidráulicos, vedações, engrenagens, rolamentos e buchas deslizantes estão ilustrados na Tabela 6 (Pall, 1990).

Tabela 6 - Desgaste de componentes de sistemas hidráulicos

Bombas, Motores Hidráulicos e Sistemas com Cilindros	Válvulas de Controle e Atuadores	Vedações	Engrenagens	Rolamentos	Buchas
Sapatas de Pistão : abrasão Bloco de cilindro: abrasão Cabeça do Pistão: cavitação / corrosão Paredes do Pistão / cilindro: abrasão Dentes de engrenagem: ver engrenagem Palhetas: abrasão/ corrosão Rolamentos: ver rolamentos Compensadores de pressão: ver válvulas	Orifícios de controle: corrosão/ erosão Carretéis: corrosão/ abrasão Camisa: corrosão/ abrasão Orifício: corrosão/ abrasão Assento: corrosão/ abrasão	Fadiga das superfícies: abrasão/ cavitação Corte das superfícies; abrasão, erosão/ corrosão	Remoção superficial: abrasão Corrosão/erosão adesão fadiga variação da espessura da película	Indentação superficial: abrasão Fadiga superficial: abrasão	Remoção superficial lenta: Corrosão/abrasão + geração de partículas = remoção superficial rápida

Fonte: PALL Industrial Hydraulics (1990)

1.10 Principais componentes de um sistema hidráulico com a recomendação para folgas características e limpeza de fluidos

Segundo Park (1997), a folga dinâmica, ou de operação, de um componente de um sistema hidráulico é definida como a espessura da película de lubrificante entre os componentes em condições de movimento e a carga aplicada. Um aumento da carga, ou uma redução da viscosidade do fluido lubrificante, poderá resultar numa diminuição da folga dinâmica.

A diminuição da folga dinâmica poderá aumentar as incidências de falhas causadas por contaminantes em sistemas hidráulicos, pois, quanto

menor a folga dinâmica de um componente hidráulico, mais suscetível será à falha por contaminação. A Tabela 7 relaciona os principais componentes hidráulicos e suas folgas características. Das folgas características de todos os componentes hidráulicos, as mais afetadas por problemas de contaminação e portanto, as mais críticas, são as folgas radiais dos carretéis em relação às luvas das válvulas eletro-hidráulicas, ou seja, válvulas de controle proporcionais, servo-válvulas e bombas de pistão.

Tabela 7 - Folga típica de componentes hidráulicos

Componentes	Folga Típica (µm)
Bomba de Engrenagens	
Dente - Placa	0,5 - 5,0
Dente - Carcaça	0,5 - 5,0
Bomba de Palhetas	
Palhetas - Lateral	5,0 - 13,0
Palhetas - Carcaça	0,5 - 1,0
Bomba de Pistões	
Pistão - Cilindro *	5,0 - 40,0
Placa de Válvulas - Cilindro	0,5 - 5,0
Servo-Válvulas	
Orifício	130,0 - 450,0
Lamela	18,0 - 63,0
Carretel - Luva *	1,0 - 4,0
Válvulas de controle	
Orifício	130,0 - 10000,0
Carretel - Luva *	1,0 - 23,0
Poppet Type	13,0 - 40,0
Disco	0,5 - 1,0
Rolamento de rolos	0,1 - 1,0
Mancais de buchas	0,5 - 100,0
Mancais hidrostáticos	1,0 - 25,0
Engrenagens	0,1 - 1,0
Selos mecânicos	0,05 - 0,5
Atuadores	50,0 - 250,0
Aviação	
Turbinas - Componentes lubrificadas	0,1 - 1,0
Componentes do sistema hidráulico	0,5 - 3,0
Transmissão de helicópteros	0,05 - 1,0
Navios - Eixo de hélice	25,0

* folga radial

Fonte: PALL Industrial Hydraulics (1990)

Para evitar o travamento desses equipamentos devido a essas folgas características com tolerâncias tão apertadas, os fabricantes de sistemas hidráulicos recomendam que o monitoramento do nível de limpeza ou contaminação do fluido seja feito através da técnica de contagem de partículas.

Essas recomendações são válidas desde a formulação do fluido novo, usado no primeiro enchimento do sistema hidráulico, bem como durante a sua utilização ao longo do tempo. A recomendação de limpeza do fluido está baseada na norma ISO 4406 (dois códigos). Em geral, a recomendação para um mesmo tipo de sistema é diferenciada entre os fabricantes; logo, tentar-se-á apresentar um valor médio que corresponde à expectativa para os sistemas hidráulicos mais utilizados. Os valores estão demonstrados na Tabela 8 (PARK, R. W., 1997).

Tabela 8 - Recomendação de limpeza de fluido de sistemas hidráulicos

Tipo de sistema hidráulico	Nível máximo de contaminação recomendado		
	Código ISSO	Partículas > 5µm máximo/ml	Partículas > 15µm Máximo/ml
Servo-válvula (operação normal)	15/11	320	20
Servo-válvula (vida estendida)	13/10	80	10
Válvula proporcional (operação normal)	16/13	640	80
Válvula proporcional (longa vida)	14/11	160	20
Sistemas hidráulicos (serviços críticos)	17/14	1300	160
Sistemas hidráulicos em geral	18/15	2500	320

Fonte: PARK, R. W. (1997)

Uma comparação pode ser abordada ao se observarem os níveis de contaminação recomendados. Um sistema convencional permite um máximo de 2500 partículas maiores que 5µm por mililitro de fluido, enquanto uma servo-válvula permite, no máximo, 80 partículas por mililitro, ou seja, esta última exige um fluido 30 vezes mais limpo (Park, 1997).

2. ESTUDO DE CASO

Conforme já comentado no capítulo anterior, a indústria da mobilidade vem buscando constantemente o desenvolvimento de produtos mais potentes, versáteis e fáceis de operar. Para tal, a indústria vem incorporando aos seus produtos a recente tecnologia de válvulas eletro-hidráulicas proporcionais e servo-válvulas nos sistemas de transmissão de força por fluidos. Essa tecnologia também proporcionou uma maior precisão e suavidade nas operações dos equipamentos. No entanto, devido a maior precisão e ajustes mais apertados entre os componentes, os sistemas de transmissão de força por fluido são mais susceptíveis e sensíveis à presença de contaminação no fluido. Para manter o desempenho desses sistemas melhorados, surgiu a necessidade de fazer o monitoramento e controle da contaminação do fluido hidráulico utilizado nos sistemas de transmissão de força. Um outro fator importante e também decisivo para a introdução desse controle é que se passou a observar que, para muitas falhas ocorridas em sistemas de transmissão de força, não havia uma explicação convincente, ou seja, o sistema era aberto para reparo e nada se encontrava que pudesse justificar a falha, ou seja, o sistema estava em excelentes condições visuais e dimensionais. Um caso típico relacionado com esse tipo de falha é o movimento de recolhimento ou projeção da haste realizada por um cilindro hidráulico sem nenhum esforço ou aplicação de carga. Um outro caso que também pode ser atribuído à contaminação, é a hesitação de válvulas eletro-hidráulicas que dificultam o posicionamento correto do sistema operacional durante a operação. No caso das válvulas, os contaminantes sólidos, ou partículas duras, se alojam nas folgas entre embolo e o canal da válvula fazendo com que a mesma falhe quando acionada. Essa falha pode provocar a hesitação do sistema, um vazamento interno da válvula e conseqüentemente uma queda de pressão, ou até mesmo o travamento do conjunto de válvula. A

Figura 18 é um exemplo claro de uma válvula que falhou devido à hesitação e posterior travamento.

Figura 18 – Contaminação em válvula hidráulica ocasionando falha

Após uma verificação dos resíduos ou partículas retidas em filtro de papel de uma análise gravimétrica, foi possível identificar uma grande quantidade de partículas duras dos mais diversos tipos, dentre as principais destaca-se: flocos de tinta devido à pintura parcial dos bocais dos tubos hidráulicos, das entradas do corpo da válvula e outros componentes com contato direto com fluido, partículas remanescentes do processo de usinagem do próprio corpo da válvula, resíduos de material de solda oriundos de componentes ou conjuntos soldados do sistema do produto e que foram arrastados para dentro das válvulas através do fluido, partículas de oxidação geradas por deficiência de limpeza ou conservação de componentes metálicos, principalmente os tubos hidráulicos e os reservatórios de fluido. Também foram identificadas partículas do corpo da válvula originadas por atrito entre os componentes da válvula e as partículas duras de contaminação. Vazamentos em cilindros hidráulicos ocasionados por riscos na haste e entupimento

precoce dos filtros hidráulicos também estão relacionados com a contaminação dos fluidos hidráulicos.

Baseado no que foi exposto no capítulo anterior, foi desenvolvido em uma empresa da região de Piracicaba um intenso programa para implantar o controle de contaminação para os sistemas de transmissão de força por fluidos. Para validar as melhorias nesse processo, foi determinado que a contagem de partículas seria a análise utilizada para avaliar o nível de limpeza do fluido, pelo fato de ser uma análise confiável, de rápida execução e avaliação dos resultados e, principalmente, por ser um processo alicerçado em normas.

No entanto, para alcançar os resultados desejáveis de limpeza do fluido de embarque do produto foram necessários o desenvolvimento de especificações de limpeza para peças, conjuntos montados e para o fluido de primeiro enchimento. Como se trata de uma nova abordagem, fez-se necessário trabalhar em conjunto com os fornecedores para implantar melhorias dos processos de limpeza e armazenamento de peças, conjuntos montados e também da formulação, envazamento e transporte do fluido. Não diferente dessa necessidade, na empresa também foram necessárias a implantação dessas melhorias em todas as etapas do processo de produção, montagem e abastecimento do fluido de primeiro enchimento. Foi necessária uma integração de todos os processos, como mostra a Figura 19, e principalmente uma mudança de cultura, uma vez que a maioria desses processos requer o manuseio e a participação do homem.

Ressalta-se também que os fabricantes de conjuntos hidráulicos, como bombas, cilindros, válvulas, motores hidráulicos e outros, já fazem uso da contagem de partículas para controle da limpeza dos fluidos das bancadas de testes dos conjuntos. A contagem é uma técnica utilizada devido à facilidade e rapidez para medição e obtenção dos resultados.

Figura 19 – Integração dos processos envolvidos no controle de contaminação

Assim, para aumentar a confiabilidade dos sistemas de transmissão de força e obter os resultados desejáveis de desempenho do produto a partir do controle de contaminação, adotaram-se as recomendações abordadas no capítulo anterior, e que estão relacionadas com o desenvolvimento de produtos limpos, desde o projeto do produto até sua manutenção no campo, passando pelos processos de fabricação, montagem dos componentes, testes dos conjuntos e de controle do fluido novo.

Com relação à mudança de cultura, foi de fundamental importância a quebra de paradigmas, pois foi necessária uma mudança radical na maneira de pensar e agir das pessoas relacionadas com a preservação da limpeza e redução da contaminação durante os processos de fabricação, montagem e testes das peças e conjuntos dos sistemas de transmissão por fluidos. Na seqüência deste capítulo, serão descritas as principais etapas de

implementação do controle de contaminação no processo com base no conceito abordado no capítulo anterior, e também serão apresentados os resultados obtidos após a implantação desse novo processo.

2.1 Implantação do controle de contaminação

A dificuldade inicial desse processo foi compreender a que se referia e por que a necessidade do controle de contaminação. A primeira impressão que se teve era que o agente causador dessa contaminação se tratava de partículas grandes, perceptíveis a olho nu, e que poderiam comprometer o desempenho do produto. Logo, tinha-se em mente que cavacos de aço oriundos de processos de usinagem, carepas e respingos originados por processos de soldagem, fuligem de queimada de cana-de-açúcar, flocos de tinta e pedaços de madeira seriam os contaminantes a serem controlados.

Não demorou a perceber que esses tipos e tamanhos de contaminantes realmente afetavam o desempenho de sistemas e que não deveriam ser apenas controlados, mas sim eliminados de todo e qualquer componente do sistema devido ao tamanho das partículas, que eram percebidas a olho nu, ou seja, sem ajuda de qualquer tipo de equipamento auxiliar. Na verdade, a nova ordem era o controle de contaminantes muito pequenos, imperceptíveis a olho nu, estabelecendo-se, a partir dessa condição, um parâmetro de difícil controle, algo abstrato, pela impossibilidade de visualização a olho nu. Essa necessidade de controle, como já referida anteriormente, não era mais uma opção, mas sim uma obrigação.

Havia a necessidade de desenvolver produtos mais produtivos, mais versáteis e com maior potência de trabalho, em atendimento às necessidades dos clientes. Porém, a confiabilidade do sistema de transmissão de força estava diretamente relacionada ao controle de contaminação dos fluidos hidráulicos.

Controlar a contaminação do fluido significa direcionar esforços em todas as etapas do processo, ou seja, desde a especificação de limpeza do fluido do produto e de componentes e conjuntos até o embarque do produto, englobando os processos de fabricação e montagem do produto. Mantendo o foco nas atividades relacionadas com a limpeza do fluido de primeiro

enchimento do produto; treinamento e conscientização do homem envolvido no processo produtivo; medição e controle de contaminação em componentes, conjuntos e produtos; melhoria de processos de fabricação e montagem dos componentes e produtos; e recebimento, estocagem e movimentação de componentes de sistemas hidráulicos.

2.1.1 Especificação de limpeza para o fluido do produto

A especificação de limpeza do fluido do produto na condição de embarque, foi determinada com base no tipo de tecnologia usada no produto para transmissão de força. Adotou-se como referência para limpeza do fluido a recomendação dos fabricantes de conjuntos hidráulicos de bombas, cilindros, motores e válvulas eletro-hidráulicas. Assim, foram estabelecidos os limites máximos aceitáveis para o nível de contaminação do fluido do produto por contagem de partículas. Conforme já comentado, esse tipo de medição, fundamentado na norma ISO 4406, estabelece códigos e valores de limites de contaminação, cuja unidade de medida é a quantidade de contaminantes por um mililitro de fluido. Essa norma estabelece o controle de contaminação em três códigos, e determina o tamanho do contaminante a ser controlado, ISO X/Y/Z, onde: X significa todos os contaminantes maiores ou iguais a $2\mu\text{m}$; Y significa todos os contaminantes maiores ou iguais a $5\mu\text{m}$ e Z significa todos os contaminantes maiores ou iguais a $15\mu\text{m}$.

Seguindo a recomendação dos fabricantes quanto ao tipo de tecnologia e conjunto hidráulico incorporado ao produto final, como válvulas, cilindros, bombas, motores hidráulicos e outros, adotou-se para o controle de contaminação dos fluidos apenas dois códigos, ou seja, ISO Y/Z ($5\mu\text{m}$ e $15\mu\text{m}$), que são os tamanhos de partículas críticas para as folgas entre os componentes dos conjuntos utilizados para a transmissão de força.

A partir desses fatores, estabeleceram-se parâmetros para controle de contaminação dos fluidos dos produtos, em que os códigos indicados representam o valor máximo aceitável, sendo, basicamente, ISO 17/14 para sistemas hidráulicos (serviços críticos) e ISO 18/15 para sistemas hidráulicos e transmissão em geral, conforme descrito na Tabela 8.

Como referido anteriormente, os limites indicados representam valores máximos permissíveis para a condição de operação do produto, desde o embarque para o cliente, durante a operação no campo e também após a substituição do fluido ou intervenção para reparo do equipamento. A condição de embarque significa que o produto está pronto e a ele não será mais incorporado nenhum componente ou acessório que porventura possa comprometer o nível de limpeza do fluido.

A especificação de limites para o nível de limpeza para o fluido do produto pronto para embarque foi o parâmetro utilizado para o nível de contaminação, o controle das etapas que envolvem o processo de fabricação e a montagem do produto, o que será abordado a seguir.

2.1.2 Especificação de limpeza para componentes e conjuntos

Antes de iniciar o rigoroso controle de contaminação, as especificações de limpeza de componentes eram brandas, tendo como maior preocupação o controle das partículas visíveis. Foi necessário adequar as especificações de limpeza de peças e conjuntos montados para essa nova realidade. A partir da definição dos requisitos de limpeza dos fluidos dos produtos, definiram-se os novos parâmetros relacionados a limites máximos de aceitação para limpeza de peças e componentes.

Para peças, determinou-se que o nível de contaminação permissível estaria relacionado com a massa da peça. Por exemplo, para peças de 0kg a 1kg de massa, o máximo de contaminação permissível seria de 1mg; para peças de 1kg a 50kg de massa, a contaminação máxima permissível seria de 1mg a 50mg, respectivamente, e, finalmente, para peças entre 50kg e 500kg, um máximo de 50mg, de acordo com a Figura 20.

Foi estabelecido que não seria permitido partículas individuais de tamanho maior que 0,1 milímetro de comprimento ou diâmetro, não importando qual o tipo de material. Esse tipo de partícula em geral é remanescente dos processos de corte e usinagem dos materiais. Uma outra condição não permitida na especificação é a presença de oxidação nas superfícies metálicas que manterão contato com o fluido do sistema.

A oxidação sofrerá uma espécie de lavagem com a passagem do fluido e todo material removido por essa lavagem irá para dentro do sistema de transmissão de força.

Figura 20 – Especificação de limpeza para componentes

Para limpeza de conjuntos montados, todos os seus componentes devem atender à especificação determinada acima para os componentes individualmente e, após montagem, o fluido utilizado para teste deverá atender à especificação de limpeza ISO 16/13. Devido provavelmente aos ajustes iniciais entre os componentes desses conjuntos, haverá a geração de contaminantes, daí a necessidade de controlar o fluido das bancadas de testes. O resultado de teste será validado com a medição da amostra do fluido coletado após o término do teste.

2.1.3 Nível de limpeza do fluido de primeiro enchimento

Para melhor entendimento, fluido de primeiro enchimento significa o fluido que será utilizado para o abastecimento inicial do produto. O nível de contaminação desse fluido deve ser muito menor do que o especificado para o produto final, ou seja mais limpo. Para atender a essa condição, faz-se

necessário investir em tecnologia de filtragem, armazenagem e transporte. No entanto, esses custos podem ser maiores ou menores, dependendo, é claro, do nível de limpeza desejável. O nível de limpeza considerado ideal para o fluido de primeiro enchimento do produto é de, no mínimo, dois códigos ISO abaixo da especificação recomendada para o produto, sendo que, para os fluidos de sistemas que requerem limpeza ISO 18/15, o fluido de primeiro enchimento deve ser ISO 16/13, ou melhor, e assim sucessivamente para outros níveis de limpeza dos fluidos dos produtos, como mencionado anteriormente.

A maior dificuldade nesse processo estava em convencer o fabricante de fluidos hidráulicos de que era possível controlar o nível de contaminação, através de baixo investimento em tecnologia de filtragem, e conscientizar as pessoas envolvidas em todo o processo, devido ao total desconhecimento do assunto. O primeiro impacto do fornecedor, quando lhe foi explicado o que significava contaminação, de que forma contaminantes eram incorporados ao fluido, as formas de controle, os níveis a serem atingidos e outros, foi de cautela e resistência, em função de este imaginar ser impossível atingir tal nível de limpeza para o fluido. Para estimular e alavancar esse processo, foram expostas ao fornecedor à introdução de novas tecnologias em sistemas de transmissão de força e também a tendência do mercado, que seria pela exigência de fluidos mais limpos, e que o desenvolvimento proposto poderia ser utilizado como um diferencial de mercado num futuro próximo.

A partir do referencial, ISO 16/13, como o nível Ideal de limpeza para o fluido novo ou de primeiro enchimento, iniciou-se o processo de medição por contagem de partículas no fluido novo. Para minimizar a inconsistência dos resultados da medição, definiu-se que a amostra seria coletada no caminhão de transporte imediatamente após a chegada à empresa, pelo fato do fluido estar homogeneizado devido ao movimento do óleo no interior do reservatório durante o transporte. Também foi definido que o local para a coleta da amostra seria próximo ao centro da carga, utilizando-se bomba de vácuo.

Os resultados das análises de contagem de partículas mostravam que o processo era estável, pois havia pouca variação nos resultados. No entanto, os resultados estavam muito aquém do desejável, pois se mantinham em torno de ISO 20/16, para basicamente todos os tipos de fluidos recebidos do fornecedor.

Devido a grande quantidade de contaminantes encontrados, iniciaram-se estudos para identificar a melhor condição para manter a limpeza do fluido desde a sua formulação no fornecedor até o enchimento do produto. Os estudos foram direcionados para identificar quais eram as etapas do processo que agregavam contaminantes. As etapas a que se refere são: formulação e homogeneização do fluido no fornecedor; envazamento do fluido do tanque de homogeneização para o caminhão de transporte; transporte do fluido; descarregamento e armazenamento dos fluidos nos tanques de armazenagem; enchimento dos produtos nas linhas de montagem. Todas as etapas do processo impactam diretamente no nível de limpeza do fluido, ou seja, todas elas, de alguma forma, adicionam contaminantes ao fluido.

2.1.3.1 Formulação e homogeneização do fluido

Este processo consiste na preparação ou fabricação do fluido para uso industrial. Para se determinar quanto significa sua contribuição na limpeza do fluido final, inicialmente analisou-se, através de contagem de partículas, o óleo básico utilizado para a formulação do fluido para o uso na indústria. Os resultados de contagem de partícula mostravam que não haveria problema em atingir o nível de limpeza desejável, pois os níveis encontrados foram melhores que ISO 15/11, ou seja, muito melhor que o limite aceitável para o fluido novo.

Em laboratório, realizaram-se também outros estudos, agora para se determinar qual o impacto que o pacote de aditivos exercia sobre a limpeza dos fluidos, resguardando-se, é claro, as devidas proporções de óleo base e aditivos. A maioria dos fluidos, após homogeneização, apresentou basicamente o mesmo resultado do óleo básico, o que comprovava a compatibilidade e a limpeza dos aditivos. No entanto, um dos fluidos apresentou um aumento no nível de contaminação muito grande, de aproximadamente três códigos, tanto para partículas acima de $5\mu\text{m}$ quanto para as acima de $15\mu\text{m}$, se comparado com o nível de limpeza do óleo básico. A questão, nesse caso, foi entender como uma proporção tão pequena de aditivos em relação ao óleo básico pôde causar tamanha alteração no nível de limpeza do fluido.

Testes adicionais foram realizados no sentido de se entender o fenômeno ocorrido, como filtragem do fluido em filtros de papel, tipo *millipore*, de alta eficiência e com posterior medição por contagem de partículas através de contador automático. Porém, a quantidade de contaminantes permaneceu inalterada, como se não houvesse partículas sólidas na amostragem de fluido. Optou-se, então, por efetuar a contagem de partículas manualmente, com auxílio de microscópio, comprovando-se, assim, que realmente a contaminação era fictícia, pois o resultado encontrado nessa contagem foi semelhante ao resultado da medição do óleo básico. O resultado real está demonstrado na Figura 21. Comparando os resultados de contagem automática de partículas com o resultado de contagem óptica, tivemos:

- Resultados por contagem de partículas obtidos na empresa - ISO 19/11;
- Resultados por contagem de partículas obtidos no fabricante do fluido - ISO 20/11;
- Resultados por contagem de partículas obtidos em laboratório Nacional - ISO 19/11;
- Resultados por contagem de partículas obtidos em laboratório Internacional - ISO 19/11;
- Resultados por contagem óptica de partículas obtidos em laboratório Nacional - ISO 13/11.

Analisando-se o pacote de aditivos, detectou-se que o dispersante de água apresenta-se turvo e a conclusão que se teve foi que esse dispersante adicionado ao óleo básico favorece a criação de uma espécie de sombreamento, que por sua vez era interpretado pelo contador automático de partículas como partícula sólida, incrementando contaminantes que não existiam na amostra. Para validar a hipótese, foi substituído o dispersante por outro compatível e o resultado obtido foi excelente, conseguindo-se um fluido com limpeza ISO 16/13 e melhor.

Conhecendo-se o nível de limpeza do óleo básico e a influência da aditivação, a última etapa desse processo consistiu na avaliação da influência do reservatório utilizado para mistura do óleo básico e aditivo no nível de limpeza do fluido final. Através de resultados de contagem de partículas das amostras coletadas do reservatório, constatou-se que este influenciava

negativamente no resultado final, incrementando contaminantes no fluido devido à sujeira contida no interior do reservatório. O incremento de contaminação foi de aproximadamente dois códigos ISO como mostra a Tabela 9.

Pall Corporation

Scientific & Laboratory Services Department

RELATÓRIO DE ANÁLISE DE FLUIDO

Projeto SLS #HB478.00

EMPRESA:	Mobil Oil do Brasil (Ind. e Com.) Ltda., São Paulo - SP
EQUIPAMENTO:	Reservatório Esteque
SISTEMA:	Hidráulico
	Volume (gal): 5284 Óleo: Mobil Cal Hidráulico 10W
FILTRAÇÃO:	Linha de Pressão; Pall
AMOSTRA:	# SH 1365
	Ponto de amostragem: Reservatório (após filtração)
EMITIDO POR:	SLS BRASIL
	Gerente Regional: Sérgio M. Rodrigues

SUMÁRIO DA CONTAGEM DE PARTÍCULAS		
Tamanho de partícula	Partículas/ ml do tamanho e maiores	Código de Faixa
> 2 μm	133	14
> 5 μm	46	13
> 15 μm	12	11
> 25 μm	3	
> 50 μm	0.8	
CÓDIGO DIS ISO 4406: 14/13/11		
Método: SAE ARP-598B

CONTAMINANTE TÍPICO

Magnificação: 100X Escala: 14 μm /divisão
 Volume analisado: 25 ml
 Diâmetro da Membrana de Análise: 25 mm

Figura 21 - Comparação entre contagem visual e contagem com contador automático de partículas - Influência do aditivo na contagem

Para manter a estabilidade do processo, o fornecedor implementou a contagem de partículas em todas as cargas de óleo básico utilizado na preparação do fluido final, passando a utilizar tanques dedicados para a

mistura e homogeneização. O novo processo adotado contribuiu significativamente para melhorar o nível de limpeza do fluido, porém não o suficiente para atender ao requisito de limpeza final para o fluido novo.

Tabela 9 – Incremento de contaminação após uso do reservatório

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6
Óleo Base	15/11	15/12	16/11	15/11	15/12	15/12
Fluido no Reservatório	17/13	17/14	18/13	17/14	17/13	17/14

2.1.3.2 Envazamento do fluido no fornecedor

Sabendo-se que o fluido homogeneizado no processo anterior estaria sujeito à instabilidade relacionada com o nível de limpeza, principalmente pela dificuldade de se manterem limpos os tanques de formulação, identificou-se que no processo de envazamento de óleo seria necessária a introdução de sistema de filtragem. Esse sistema foi composto por filtros de alta eficiência, sendo especificados para satisfazer a limpeza final do produto em apenas uma filtragem (única passagem) do fluido. Para atender a essa situação, foi necessária a instalação de uma bateria de filtros, também conhecida como “cascata”, tendo-se a filtragem das partículas maiores (mais grossas) no início e as menores no final.

Para o sistema de envazamento, também foi analisado o seu potencial de risco de contaminação, ou seja, a sua contribuição para a contaminação do fluido novo. Uma das evidências concretas identificadas foi o fato de a tubulação permanecer aberta na extremidade de enchimento do caminhão. Como a instalação física da planta do fornecedor ficava próxima ao litoral, era muito comum a presença de sílica nas amostragens dos fluidos coletados para análise. Assim, foi necessário o desenvolvimento de proteções para fechamento dessas extremidades.

Um outro fato é que o fornecedor utilizava esse mesmo sistema de descarga para fluidos fornecidos para outros fluidos, sem nenhum tipo de controle de contaminação. Ocorria que, em função disso, a tubulação era

contaminada por tais fluidos. Para minimizar essa situação, foi necessário introduzir um processo de limpeza da tubulação, fazendo-se circular óleo básico pela tubulação durante um determinado período, o suficiente para garantir a limpeza do condutor de envazamento. A Tabela 10 mostra o incremento de contaminação após o envazamento do fluido. Em média o incremento de contaminação nesse processo foi de um código ISO.

Tabela 10– Incremento de contaminação após o envazamento do fluido

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6
Fluido no Reservatório	17/13	17/14	18/13	17/14	17/13	17/14
Fluido no envazamento	18/14	18/14	18/15	18/15	18/14	18/15

2.1.3.3 Transporte do fluido

Como abordado até o momento, toda a superfície em contato com o fluido deveria estar limpa, pois de nada adianta fabricar um óleo limpo se o reservatório do tanque de transporte estiver contaminado. Em geral, a responsabilidade pelo transporte do fluido do fornecedor para o cliente é do fornecedor. Para manter o nível de limpeza desejado foi necessário conscientizar a empresa de transporte sobre a sua responsabilidade nesse processo, pois era necessário manter o mesmo nível de limpeza do fluido dentro do caminhão se comparado com o que foi envazado. Medições realizadas através de contagem de partículas no fluido após o enchimento do caminhão utilizado para transporte mostravam que esse processo incrementava contaminantes ao fluido em pelo menos um (1) código ISO, o que significava dobrar a quantidade de partículas no fluido. O fato descoberto nesse processo é que as empresas de transporte não possuem caminhões dedicados, ou seja, transportam-se fluidos dos mais variados tipos e sem nenhuma preocupação de limpeza. A Tabela 11 mostra o incremento de contaminantes no fluido novo, após envazamento, devido à contaminação do sistema de transporte.

Tabela 11– Incremento de contaminação durante o transporte do fluido

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6
Fluido no envazamento	18/14	17/14	18/15	18/15	18/14	17/15
Fluido no caminhão	19/15	18/15	19/15	19/16	19/15	18/16

Outra questão é que os tanques de transporte são, em sua maioria, de aço carbono, e cujo estado de conservação, em geral, são bastante deficientes. Esses tanques são limpos internamente com água e detergente para a remoção da sujeira e resíduos de outros fluidos. O agravante, nessa limpeza, é que, além da não-remoção de boa parte da sujeira sólida, existe a dificuldade de secar internamente as paredes metálicas do tanque e, assim, a carga de fluido era contaminada por partículas e também por água.

Para minimizar o impacto causado pelo excedente de contaminação no sistema de transporte, foram efetuadas algumas melhorias nesse sistema, dentre as quais a substituição de tanques de aço carbono por tanques de aço inoxidável e a eliminação do processo de lavagem dos tanques, passando a ser utilizados apenas caminhões que transportam óleo básico, garantindo, dessa forma, que nesse processo a agregação de contaminação ao fluido seria mínima. Também ocorreu a adequação do volume da carga de fluido ao tamanho (área do tanque) do caminhão, ou seja, a carga passou a preencher todo o volume interno do tanque, restando o mínimo possível de área livre, diminuindo, assim, a área banhada pelo fluido.

O transporte do fluido era a última etapa do processo sob a responsabilidade do fornecedor. Dessa forma, era de extrema importância assegurar que não haveria a incorporação excessiva de contaminantes. Como garantia de que a carga não seria despachada com o fluido contaminado, após o enchimento, o caminhão era movimentado para que ocorresse a homogeneização do fluido no interior do tanque, uma espécie de lavagem das paredes internas. Após isso, coletava-se uma amostra e efetuava-se a contagem de partículas para se certificar de que o fluido reunia as condições desejáveis. Caso o resultado da análise informasse que a carga estava contaminada, lançava-se mão do último recurso, que era a filtragem do fluido

do interior do tanque do caminhão, através do sistema de filtragem conhecido como *kidney-looping* ou hemodiálise, até se obter o nível desejável de limpeza.

O princípio de funcionamento desse sistema é muito simples, uma bomba hidráulica faz a sucção do fluido do reservatório principal, conduz o fluido por uma bateria de filtros que retorna para o reservatório principal após a filtragem. Esse é um processo contínuo e lento, pois depende do volume de fluido a ser filtrado e da vazão da bomba de sucção. A Figura 22 mostra um sistema de transporte com filtragem incorporada.

Figura 22 – Sistema de transporte com filtragem incorporada

Devido à dificuldade em se manter limpos os reservatórios dos caminhões de transporte, houve a necessidade de se fazer o uso desse sistema de filtragem, que foi incorporado ao próprio caminhão de transporte. Dessa forma, o fluido é filtrado constantemente durante o trajeto do caminhão, assegurando que ela atenda a especificação de limpeza ISO 16/13. Na tabela 12, são informados os valores dos níveis de limpeza dos fluidos recebidos

nessa nova condição de transporte. É possível verificar a melhoria implantada no processo.

Tabela 12– Processo de transporte do fluido com filtragem incorporada

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6
Fluido no caminhão (processo antigo)	19/15	18/15	19/15	19/16	19/15	18/16
Fluido no caminhão (processo novo)	14/11	14/12	13/11	14/11	13/11	14/11

2.1.3.4 Descarregamento e estocagem do fluido em tanques

Encerrado o ciclo de controle relacionado ao processo para fabricar, envazar e transportar fluido limpo, iniciaram-se, a partir do descarregamento e estocagem, as atividades para manter e até mesmo melhorar o nível de limpeza do fluido recebido. Devido ao contato do fluido com a tubulação durante o descarregamento do fluido, algumas medidas de precaução foram necessárias para se manter o nível de limpeza desejado com relação ao correto manuseio dos tubos, mangueiras e limpeza dos terminais de descarregamento do caminhão, além da implementação de proteções para armazenamento dos acessórios utilizados para descarregamento.

Foram instalados, na linha de descarga do fluido, filtros de alta eficiência ($\beta_2 = 200$) para melhorar o nível de limpeza do fluido durante o descarregamento, como mostra a Figura 23. Esses mesmos filtros foram interligados ao sistema de bombeamento e ao reservatório, possibilitando a execução da filtragem do fluido armazenado no tanque, caso fosse necessário. Os tanques de armazenagem foram alterados fisicamente, para propiciar o melhor acondicionamento do fluido. Tanque subterrâneo foi substituído por tanque elevado, e nos tanques elevados, já existentes, foram adaptadas válvulas especiais para coleta de fluido para análise e ainda, instalados filtros de sílica gel nos bocais de admissão de ar.

Também foi alterado o fundo dos tanques, de planos, para suavemente inclinados na forma de “V”, para facilitar o dreno da água livre e partículas

sólidas que decantam e se depositam no fundo do tanque. Um outro fator observado foi que, após o descarregamento do fluido no tanque, seu nível de contaminação aumentava, o que ocorria devido à turbulência causada pela alta vazão e pressão durante o processo de descarregamento. Logo, foi necessária a correção através da instalação de quebra-ondas. A Tabela 13 mostra o nível de contaminação durante o descarregamento, com a amostra coletada após a passagem do mesmo pelo filtro de alta eficiência.

Figura 23 – Sistema de filtragem para descarregamento do fluido

Essa mesma tabela mostra o nível de contaminação do fluido no reservatório e imediatamente após o descarregamento. É possível observar que o nível de contaminação sofre um aumento em torno de dois códigos ISO.

Tabela 13– Limpeza do fluido no processo de descarregar e armazenar o fluido

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6
Fluido após filtro	13/11	13/10	14/11	13/11	13/11	13/11
Fluido no reservatório	15/12	15/13	15/12	14/12	15/12	15/12

2.1.3.5 Enchimento dos fluidos nos produtos

A última etapa do fluxo do fluido no processo era o enchimento dos reservatórios dos produtos. Não diferentemente das etapas analisadas anteriormente, aqui, neste processo, levou-se em consideração que o deslocamento do fluido, desde o parque de tanques até a bomba de enchimento do produto, também poderia agregar contaminantes.

Iniciou-se, então, a verificação dos próprios dutos de condução dos fluidos do parque de tanques até o ponto de uso. Por se tratar de tubulações antigas e subterrâneas, decidiu-se pela sua substituição por tubulações novas; e ainda, sistemas elevados e de galerias garantindo que os novos dutos não entrassem em contato com o solo, garantindo menor possibilidade de oxidação e portanto, maior vida útil.

Ainda com relação aos dutos, foram identificados e corrigidos todos os locais que eram passíveis de acumulação de água livre, por causa de diferencial de altura, e até mesmo formação de cotovelos. Foram revisados todos os sistemas de abastecimento e substituídas as mangueiras e bicos de enchimento. Todas as iniciativas contribuíram para minimizar a adição de contaminantes ao fluido. No entanto; para garantir o nível de limpeza desejado, foram instalados filtros de alta eficiência ($\beta_2 = 200$) em todos os sistemas de abastecimento, após a bomba, como mostra a Figura 24. Dessa forma, o objetivo de introduzir um óleo com nível de limpeza ISO 16/13 no produto foi atingido.

Após todas essas etapas concluídas, estabeleceu-se um monitoramento para o fluido de primeiro enchimento, no qual todas as cargas recebidas eram analisadas antes do descarregamento na empresa. Também foram estabelecidos monitoramentos semanais para os fluidos nos tanques de armazenamento e nos sistemas de abastecimento.

Figura 24 – Filtragem de fluido no sistema de abastecimento

Com relação ao nível de contaminação do fluido no ponto de enchimento do produto, observou-se que a contaminação agregada ao fluido era maior que a contaminação do reservatório principal em pelo menos dois códigos. Após a instalação dos filtros de alta eficiência nos sistemas de abastecimento, o nível de limpeza do fluido manteve-se em patamares iguais ou muito próximos ao do nível do reservatório, como pode ser observado na Tabela 14. Assim, observa-se que o nível de limpeza desejado para o sistema de abastecimento, ISO16/13 ou menor, é possível de ser alcançado.

Tabela 14– Limpeza do fluido no processo de enchimento do produto

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	Amostra 6
Fluido no reservatório	15/12	15/13	15/12	14/12	15/12	15/12
Fluido no enchimento (sem filtro)	17/13	16/13	16/13	16/14	17/13	17/14
Fluido no enchimento (com filtro)	15/12	15/13	14/11	15/12	15/11	15/12

Para tal é necessário o controle efetivo em todas as etapas do processo de manuseio do fluido, ou seja, desde o controle do processo no fornecedor até a condição de enchimento no produto.

2.1.4 Treinamento e conscientização do homem

A mão-de-obra é um dos fatores mais críticos dentro desse processo e tem influência direta nos resultados de contaminação dos componentes, conjuntos e do fluido do produto final. Por se tratar de partículas invisíveis, foi necessário treinamento e conscientização das pessoas envolvidas com os processos de fabricação, movimentação e montagem dos produtos, no sentido de explicar a todos a necessidade de se controlar a contaminação, demonstrando quais eram os tamanhos críticos de controle e, principalmente, o que era esperado de cada um nesse processo.

Para treinamento e conscientização dos empregados, foram utilizados materiais didáticos dos mais variados possíveis, dentre os quais:

a) vídeos, que mostram o desempenho do produto sendo comprometido por excesso de contaminantes que foram introduzidos no sistemas hidráulico e de transmissão, e como esses contaminantes entraram no sistema, os principais danos causados por contaminantes aos componentes internos dos sistemas de fluidos (bombas, válvulas, cilindros e outros), explicações sobre os sistemas de filtragem, processo este que muitos pensavam ser a solução para eliminar os contaminantes presentes no fluido;

b) *cartazes* (banners) com informações adicionais sobre contaminantes e seus efeitos, mas principalmente respostas sobre possíveis dúvidas que esse processo traria sobre a mente das pessoas;

c) recursos computacionais que envolviam todas as questões abordadas e que foram disponibilizados em computadores para auto-treinamento individual dos envolvidos.

A maior dificuldade foi o entendimento por parte dos empregados sobre o controle dos contaminantes, já que se tratava de tamanhos imperceptíveis a olho nu. Na verdade, para que esse processo atingisse seu objetivo, foi necessário muito mais do que conscientização: uma mudança de cultura, da maneira de pensar, agir e trabalhar.

Era esperada uma resistência inicial por parte dos funcionários, em face da mudança radical que ocorreria na maneira de pensar e agir dos empregados. As principais mudanças estavam relacionadas com:

a) manter as proteções de peças e componentes desde o recebimento até o momento da utilização, ou seja, manusear os componentes cuidadosamente para que não ocorressem danos ou perdas das proteções e que pudessem agregar contaminantes “sujeira” durante os processos de recebimento, movimentação, estocagem e montagem dos componentes;

b) manter o local de trabalho sempre limpo (*housekeeping*) e, dessa forma, contribuir para um processo de montagem limpo, que se baseava no processo de eliminação dos contaminantes visíveis, propiciando, assim, um ambiente agradável para se trabalhar;

c) remover as proteções e embalagens dos componentes com o devido cuidado, a fim de não adicionar os contaminantes externos depositados sobre as embalagens nas superfícies de contato com o fluido, o que pode ser exemplificado, como aquela sujeira (pó) que se depositou sobre a embalagem ou proteção durante o período em que os componentes permaneceram em movimentação ou estoque, flocos de tinta que se desprendem das proteções de tubos e mangueiras;

Para avaliar os itens acima, foi introduzida no processo uma avaliação com o objetivo de identificar as oportunidades de melhoria, com uma série de itens como: condição da embalagem durante o recebimento e armazenamento dos componentes, condição de recebimento dos componentes quanto a presença oxidação, preservação da embalagem dos componentes durante o processo de montagem, controle do processo de fabricação de itens relacionados com sistema de transmissão de fluido, limpeza e conservação de reservatórios usados para armazenagem do fluido e outros. Como resultado inicial desse processo, menos de 60% dos itens avaliados estavam em conformidade com o novo processo. Como resultado do trabalho de treinamento e conscientização o nível de conformidade ultrapassou a 95%, ou seja, demonstrando que houve uma melhoria significativa no processo.

2.1.5 Medição e controle de contaminação em componentes, conjuntos e produtos

Foi necessária a adoção de métodos para medição e acompanhamento dos indicadores críticos de contaminação. Foram desenvolvidas metodologias

para cada um dos tipos de medição relacionados com a contagem de partículas, a fim de se determinar a limpeza do fluido de primeiro enchimento e do produto após aprovação de embarque para o cliente, e análise gravimétrica para se determinar o nível de contaminação em massa para os componentes.

Para ambos os casos, identificou-se que as medições iniciais não eram consistentes, sendo então necessário criar procedimentos específicos para coleta e medição das amostragens. Também foi efetuado o acompanhamento de problemas de campo relacionados com reclamações de clientes e pagamento de garantia devido a problemas de contaminação. Os resultados obtidos nas análises eram informados a todos os interessados no processo, para que tomassem conhecimento dos resultados, identificando as oportunidades de melhoria dentro de cada uma das áreas de atuação. A medição e controle de contaminação dos fluidos e de componentes estão descritos a seguir:

2.1.5.1 Medição e controle de contaminação dos fluidos de primeiro enchimento e do produto final

A primeira etapa neste processo foi entender como era o comportamento das análises efetuadas nos fluidos. Uma das primeiras evidências que se tornou clara foi que as amostras de fluidos de primeiro enchimento, coletadas em garrafa e analisadas em contador automático de partículas, apresentavam uma variação muito grande se comparadas com outras amostras coletadas em um mesmo local. Identificou-se que eram duas as variáveis que afetavam a consistência do resultado da análise final, sendo:

a) sujeira no frasco utilizado para coleta – observou-se, através de análises microscópicas com ampliação de 100 vezes, como mostra a Figura 25, que o frasco utilizado para a coleta apresentava um nível de sujeira em seu interior que comprometia o resultado da análise, sujeira esta resultante do processo de fabricação “injeção” do frasco plástico, predominando fibras de plástico e óleo de lubrificação do molde. Os resultados dessa observação, ou seja, da comparação entre os resultados da contagem de partículas entre frascos originais e frascos esterilizados estão informados na Tabela 15.

Figura 25 – Contaminação em frascos de coleta de amostra

Para mostrar a diferença efetiva dos resultados, serão usadas as quantidades de partículas maiores que $5\mu\text{m}$ e $15\mu\text{m}$ encontradas e não a classificação ISO.

Tabela 15 –Resultado da contagem- Frasco original versus esterilizado

Resultado de Contagem de partículas (quantidade de partículas por mililitro)						
Fluido	Frasco Original $5\mu\text{m}$	Frasco Original $15\mu\text{m}$	Frasco Esterilizado $5\mu\text{m}$	Frasco Esterilizado $15\mu\text{m}$	Diferença Partículas $5\mu\text{m}$	Diferença Partículas $15\mu\text{m}$
SAE 10W	1310	73	1115	45	15 %	38%
SAE 30W	1850	94	1480	70	20 %	26%
SAE 50W	1745	85	1532	58	12 %	32%

Observa-se que as diferenças entre os resultados de contagem de partículas, considerando a condição do frasco de coleta do fluido, são consideráveis. Numa comparação, para uma mesma amostra de fluido SAE 10W, coletada em frascos com limpeza original e com limpeza especial por esterilização, a diferença na quantidade de partículas é de 15% maior para partículas de tamanho $5\mu\text{m}$ e de 38% maior para tamanho $15\mu\text{m}$, para amostra do frasco com limpeza original. Para os outros tipos de fluido observa-se que

também ocorreram diferenças similares. Os resultados mostram que a limpeza do frasco influencia diretamente no resultado da medição. Assim, se faz necessário tomar cuidado com o manuseio da amostra e com a limpeza dos frascos.

b) O próprio processo de medição, porém relacionado à preparação da amostra. Com relação a isso, foram efetuadas algumas melhorias para se manter a consistência nas análises de contagem de partículas, dentre elas o aquecimento da amostra de fluido a uma temperatura em torno de 60° C para diminuir a sua viscosidade e, assim, eliminar sua diluição com solvente. Outra melhoria significativa foi à introdução de um equipamento de homogeneização automático em substituição ao processo manual, o que, além de melhorar a homogeneização, reduziu a aeração (bolhas de ar) na amostra como mostra a tabela 16. Também nesse caso, são informadas as quantidades de partículas maiores que 5µm e 15µm e não a classificação ISO como resultado final.

Tabela 16 –Resultado da contagem- Amostra com remoção e sem remoção de ar- Laboratório

Resultado de Contagem de partículas (quantidade de partículas por mililitro)						
Fluido	Sem remoção de bolhas 5µm	Sem remoção de bolhas 15µm	Com remoção de bolhas 5µm	Com remoção de bolhas 15µm	Diferença Partículas 5µm	Diferença Partículas 15µm
SAE 10W	1332	169	985	108	26 %	36%
SAE 30W	1151	109	877	86	24 %	21%
SAE 50W	1622	174	1020	101	37 %	42%

Finalizando esta etapa, houve a introdução de um equipamento de ultrassom, utilizado para a remoção de bolhas de ar da amostra do fluido. Todas essas iniciativas, além de melhorarem significativamente a consistência dos resultados, também trouxeram benefícios relacionados à redução de tempo de análises das amostras. A melhoria referente à preparação da amostra para a análise de contagem de partículas pode ser observada na Figura 26.

A mesma mostra a seqüência de análise de contaminação por contagem de partículas desde a homogeneização, remoção de bolhas de ar e também a análise de contagem de partículas propriamente dita.

Com relação aos produtos, identificou-se uma série de oportunidades de melhorias no processo de medição do fluido do produto, dentre as quais a necessidade de aquecer o fluido de todos os compartimentos a serem monitorados quanto ao controle de contaminação, para uma melhor homogeneização dos sistemas; descarte das duas ou três primeiras amostras, quando efetuada medição direta no produto *on-line*; além do descarte de aproximadamente 300ml de óleo quando coletado em garrafa para análise, em função da sujeira que se acumulava no ponto de coleta do fluido durante o processo normal de operação do produto.

Figura 26 – Preparação e contagem de partículas em laboratório

A Tabela 17 mostra a redução de viscosidade do fluido, quando submetido a diferentes temperaturas. Essa redução drástica da viscosidade, ou seja, superior a 75% foi de extrema importância para o processo, uma vez que isso permitiu melhorar a dispersão e remoção das bolhas de ar das amostras e principalmente permitir que a contagem de partículas para fluidos com

viscosidades maiores, como por exemplo SAE 50W, em cujo processo de contagem de partículas era necessária a diluição do fluido em solvente limpo para diminuir a viscosidade do mesmo. Esse processo de diluição requer um cuidado especial na proporção da diluição e isso pode afetar o resultado final da contagem de partículas.

Tabela 17 – Comparação de viscosidade do fluido

Análise de Viscosidade (Cst)			
Fluido	Temperatura 25° C	Temperatura 60° C	Diferença (%)
SAE 10W	70.4	17.4	75 %
SAE 30W	233.0	38.0	84 %
SAE 50W	484.0	55.8	88 %

Ainda relacionado à medição direta *on-line* do fluido dos produtos, foram identificados locais apropriados para medição, ou seja, todos os pontos de tomadas de amostras e análises foram instalados antes do sistema de filtro principal do produto e em um local de fluxo turbulento, com a finalidade de se manter o fluxo sempre homogêneo. A Figura 27 mostra uma medição direta por contagem de partículas no produto.

Figura 27 – Contagem de partículas direto no produto

Um outro fato importante que ocorreu durante o processo de implementação de controle de contaminação dos fluidos dos produtos foi que em alguns sistemas ocorria aeração, e isso afetava diretamente o resultado quando realizado através de medição direta. Para esses casos, a única solução foi coletar amostras em frascos e fazer a análise de contagem de partículas em contador automático de laboratório, embora o custo para essa segunda opção fosse bem maior que a primeira.

Como referência, a aeração acrescia em mais de 70% a quantidade de partículas na faixa de 5 μ m a 15 μ m, o que comprometia a confiabilidade dos resultados. Também fizeram parte deste processo a análise e o controle dos fluidos utilizados em máquinas de testes de vazamento de conjuntos hidráulicos. Para esse tipo de equipamento, definiu-se que a limpeza do fluido utilizado deveria atender a um nível ISO 16/13, após o teste final do conjunto; assim, seria introduzido ao produto final com o mesmo nível de limpeza do fluido de primeiro enchimento, não o comprometendo na condição de embarque. Com relação aos resultados encontrados na medição direta e na medição com contador de partículas, e que representam uma diferença significativa de aproximadamente 70%, estão demonstrados na Tabela 18.

Tabela 18 – Resultado da contagem- Amostra com remoção e sem remoção de ar- Amostra do produto

Resultado de Contagem de partículas (quantidade de partículas por mililitro)						
Fluido	Sem remoção de bolhas 5 μ m	Sem remoção de bolhas 15 μ m	Com remoção de bolhas 5 μ m	Com remoção de bolhas 15 μ m	Diferença Partículas 5 μ m	Diferença Partículas 15 μ m
SAE 10W	1712	145	758	42	56 %	71%
SAE 30W	1485	90	678	37	54 %	59%
SAE 50W	1632	92	673	31	59 %	66%

2.1.5.2 Medição de contaminação de componentes através de análise gravimétrica

Após identificar todos os componentes que faziam parte desse processo, ou seja, aqueles que tinham contatos com o fluido dos sistemas de transmissão

de força dos produtos, foi estabelecido um plano para medir aleatoriamente a contaminação dos componentes.

O intuito da análise gravimétrica não era somente no sentido de determinar se o componente atendia ou não aos requisitos da especificação; era óbvio que se desejava que todos os componentes reunissem as condições definidas na especificação, porém era sabido que isso seria quase impossível. Logo, essas análises serviram de base para implementação de melhorias nos processos de fabricação na planta e nos fornecedores.

Como exemplo, identificou-se que os tubos que eram lavados internamente à empresa estavam se oxidando durante o tempo de permanência no estoque, pelo fato de o processo de lavagem não ser adequado para tal, ou seja, a alta pressão gerada no sistema de lavagem fazia com que névoa de água penetrasse no interior dos tubos através das proteções de fechamento das extremidades, ocasionando, assim, oxidação.

Os resultados das análises gravimétricas têm proporcionado informações importantes para o processo, identificando oportunidades para melhorar o nível de limpeza dos componentes. Por exemplo: o tipo de fluido utilizado como protetivo contra oxidação, em alguns casos, era o principal contaminante dos componentes; em outros, o próprio ambiente fabril era o principal agente contaminador, em função de os componentes permanecerem sem proteção ou embalagem adequada.

O teste gravimétrico foi à análise que possibilitou visualizar o quanto os fornecedores domésticos, em sua grande maioria, estavam despreparados para trabalhar com esse novo conceito relacionado ao controle de contaminação. Esse despreparo estava relacionado tanto em relação aos conceitos relativos à contaminação como também à falta de equipamentos e recursos dedicados ao seu controle.

A análise gravimétrica está relacionada com a quantidade de massa e tamanho das partículas agregadas nos componentes. Para a remoção dos contaminantes é utilizado um processo de lavagem manual com solvente extremamente limpo, ISO 11/7 ou mais limpo. Para esse processo pode ser utilizado um pincel para a lavagem externa e também esferas de aço para lavagem no interior de tubos e orifícios.

2.1.6 Melhoria de processos de fabricação e montagem dos componentes e produtos

Foram necessários recursos e desenvolvimento junto aos fornecedores de componentes e conjuntos, para a implantação de processos mais limpos e diferenciados, e que contemplassem a limpeza como um processo normal. A princípio, todos os fornecedores, após entender o que era a contaminação e as possíveis fontes de contaminação de um componente, imaginavam que seria necessário muito investimento na planta, principalmente em máquinas de lavar de alta eficiência. Foi necessário partilhar com os fornecedores que apenas adquirir máquinas de lavar de alta eficiência não seria a solução do problema, pois era necessário muito mais que isso: era necessário conhecer todas as operações do processo de fabricação e montagem. Necessitavam identificar e mapear todas as fases do processo e, assim, determinar as atividades que agregavam mais ou menos contaminantes.

A realidade era que a maior parte dos fornecedores nacionais não estava preparada para atender a esse novo requisito de qualidade, denominado controle de contaminação. Por mais que se tentasse convencê-los sobre a real necessidade do controle, suas justificativas estavam ligadas à questão de investimento.

Nos fornecedores nacionais que optaram por trabalhar no sentido de atender aos requisitos de limpeza, foi observado que, além de novas técnicas de lavagem implementadas, também foi necessário trabalhar na filtração de fluidos protetivos, utilizados contra oxidação, e no desenvolvimento e aplicação de embalagens corretas para manuseio, movimentação e estocagem. Como não poderia ser diferente, a mão-de-obra também foi devidamente treinada e conscientizada com relação à sua conduta nos processos mais críticos, melhorando o processo interno de fabricação e implantando o controle de contaminação, como mostra a preparação, lavagem e coleta da amostra do solvente para a análise gravimétrica. Ainda como melhoria de processo no fornecedor, é possível observar o processo de montagem de cilindros e bombas em um ambiente fechado e isolado do ambiente fabril. O mesmo está

em um local isolado do ambiente fabril, sendo assim, mais adequado para o processo de montagem de conjuntos, como mostra a Figura 28.

Figura 28- Ambiente de montagem de conjuntos hidráulicos

Também os fornecedores de tubos hidráulicos tiveram oportunidade de melhorar o processo, uma vez identificado que na maioria dos tubos havia a presença de oxidação. Além de melhorar o processo de lavar, também ocorreu a melhoria no processo de secagem dos tubos, principalmente com o desenvolvimento de dispositivos apropriados, como mostra a Figura 29.

Figura 29- Dispositivo de secagem de tubos hidráulicos

Internamente na empresa, os processos de fabricação e montagem que já estavam implementados no chão de fábrica passaram por uma reavaliação, para identificação das oportunidades de melhoria. Para os itens fabricados, as oportunidades mais importantes estavam relacionadas com os reservatórios principais do fluido hidráulico dos produtos, nos quais havia, basicamente, alta

concentração de respingos e carepas nas juntas soldadas devido ao aquecimento do processo, além de oxidação e sujeira oriundas dos processos de transporte e estocagem. Nesse caso foi necessário mudar radicalmente o processo, principalmente os relativos à lavagem e montagem.

Para o processo de lavagem, foi adquirido equipamento de alta eficiência em substituição ao equipamento de lavagem manual, sendo necessária ainda, para garantir o nível de limpeza adequado, a adição de um processo de decapagem química através da utilização de produto à base de ácido fosfórico, para remoção dos respingos de solda e oxidação. No entanto, para remoção dos respingos de solda, foi necessário introduzir um processo de remoção manual por escovação.

Não obstante das melhorias citadas, observou-se que, após a montagem final dos tanques, a quantidade de contaminação ainda era muito acima do desejável; logo, esse adicional de contaminação era uma contribuição do ambiente fabril, devido ao fato de a montagem dos reservatórios estar situada em área próxima à de soldagem e remoção de respingos. A Figura 30 mostra como era o processo antigo de montagem dos reservatórios dos fluidos.

Figura 30 –Montagem de reservatório de fluido - processo antigo

É possível observar que os reservatórios ficavam abertos e desprotegidos durante todo o processo de montagem e isso proporcionava um aumento significativo da contaminação dos reservatórios. Essa contaminação adicional foi medida através de recipiente apropriado colocado próximo ao local da montagem dos reservatórios e o resultado obtido através da análise

gravimétrica foi de aproximadamente 190 miligramas de contaminantes por metro quadrado a cada 24 horas. A Figura 31 mostra o filtro utilizado para a análise da contaminação, bem como uma foto ampliada em 50 vezes desse filtro, onde mostra os contaminantes contidos na análise. Na foto ampliada os principais contaminantes encontrados foram: partículas metálicas, poeira, sílica e flocos de tinta.

Figura 31–Análise gravimétrica de contaminação ambiente – processo antigo

A contaminação do reservatório principal do fluido pode ser maior ou menor nesse ambiente, dependendo do tempo em que o mesmo fica exposto ou aberto durante o processo de montagem. Pelo fato do local de trabalho ser um ambiente agressivo devido ao fato de estar localizado ao lado de um processo de soldagem, foi necessária a construção de uma sala de montagem especial com pressão positiva, denominada “sala limpa”, a fim de obter controle ambiental relacionado a insulflamento de ar e isolamento da área de montagem em relação ao ambiente fabril, como mostra a Figura 32.

Figura 32 –Sala de montagem de reservatório de fluido- processo modificado

A mudança de processo do reservatório principal do ambiente de fábrica para uma sala especial reduziu significativamente o incremento da contaminação devido às condições do ambiente. Usando a mesma metodologia de medição e análise do processo, o resultado obtido através da análise gravimétrica foi aproximadamente 0,7 miligrama de contaminantes por metro quadrado a cada 24 horas. A Figura 33 mostra o filtro utilizado para a análise da contaminação, bem como uma foto ampliada em 50 vezes desse filtro, onde mostra os contaminantes contidos na análise.

Filtro usado para análise

Foto ampliada 50 vezes

Figura 33 –Análise gravimétrica de contaminação ambiente - processo Melhorado

Na foto ampliada os principais contaminantes encontrados foram: partículas metálicas e flocos de tinta. Através das mudanças implantadas nos processos de fabricação do reservatório principal de fluido, descritos acima foi possível reduzir drasticamente o nível de contaminação dos reservatórios, ajudando assim a melhorar o nível de limpeza do fluido de embarque do produto.

Para se ter uma noção de grandeza das melhorias proporcionadas pelas mudanças no processo, foi possível reduzir a contaminação dos reservatórios principais de fluido de 500 miligramas de contaminação para menos de 40 miligramas em média. Isso significa uma redução de mais de 90% da contaminação.

Nas áreas de montagem do produto final, foram reavaliados todos os processos relacionados com conjuntos de sistemas hidráulicos, sendo estes melhorados significativamente com relação ao conceito de contaminação. A principal ênfase nesse processo foi a melhoria dos dispositivos de testes e montagem quanto à disposição do produto, além de coberturas (proteções) para minimizar o impacto causado pela contaminação. Dentro das atividades desenvolvidas e coordenadas por esse time também estiveram presentes a avaliação e a alteração de *layout* nas linhas de montagem e sub-montagem, a fim de permitir melhores condições para os funcionários e, com isso, minimizar os impactos relativos à contaminação causada pelo ambiente fabril. Também foram desenvolvidos planos de manutenção preventiva para todos os equipamentos relacionados com o processo de controle de contaminação, máquinas de teste hidráulico e máquinas de lavar, principalmente com relação aos sistemas de filtragem, controle dos fluidos e manutenção da eficiência dos equipamentos.

2.1.7 Recebimento, estocagem e movimentação de componentes de sistemas hidráulicos

Tornou-se uma necessidade básica manter os componentes recebidos de fornecedores externos sem agregar contaminantes durante o processo de recebimento, estocagem e movimentação, sejam eles domésticos ou

internacionais, fabricados ou montados internamente. Dessa forma, durante o recebimento dos materiais comprados, passou-se a fazer uma inspeção visual para verificar a condição das proteções dos componentes, sendo que essa etapa era, na verdade, uma espécie de filtro. Além disso, o tratamento dado aos itens relacionados com sistemas de fluidos passou a ser diferenciado, principalmente na questão do manuseio referente à contagem física dos componentes, mantendo-se, assim, preservadas as proteções originais e até mesmo adicionando, às vezes, uma proteção extra para suportar um maior período de estocagem. A Figura 34 é um exemplo claro de aplicação de embalagem para preservação da limpeza dos componentes durante as etapas do processo.

Figura 34 –Embalagem de pequenos componentes

Com relação à movimentação, tomaram-se cuidados especiais com itens de difícil movimentação em função do tamanho ou da forma geométrica; assim, foram desenvolvidos dispositivos especiais para que a movimentação fosse feita sem danificar a proteção dos componentes. As condições de estocagem foram reavaliadas para proporcionar a melhor estocagem para os componentes de sistemas de transmissão de força. O fato é que muitos componentes e conjuntos grandes, tais como: cilindros hidráulicos, motores, transmissões, reservatórios de fluidos e outros, agregavam contaminação durante o processo de transporte e armazenagem, pois permaneciam estocados sem uma proteção adequada, e se tornavam mais suscetíveis à contaminação por poeira, água e, principalmente, oxidação. Para minimizar e praticamente

erradicar o problema, esses conjuntos foram embalados de forma diferenciada para evitar a oxidação e contaminação por água. A Figura 35 é um exemplo de proteção contra contaminação utilizada para a preservação de cilindros hidráulicos durante os processos de transporte, manuseio e armazenamento.

Embora essa nova abordagem sobre contaminação esteja relacionada com o controle de partículas minúsculas, ou imperceptíveis a olho nu, foi demonstrado até agora, que é possível manter a contaminação sob controle e em níveis aceitáveis, sem consequências catastróficas ao produto. Na seqüência demonstraremos os principais resultados globais alcançados no processo.

Figura 35 –Embalagem e armazenagem de cilindros hidráulicos

2.2 Resultados

Na seqüência desse capítulo, seguem os principais resultados relativos ao controle de contaminação, obtidos através de esforços direcionados em todas as etapas do processo, principalmente aquelas que envolvem contagem de partículas. A Figura 36 mostra os resultados das melhorias obtidas junto ao fornecedor de fluido hidráulico, ou seja, o nível de limpeza do fluido que está sendo fornecido na condição de descarregamento. Isso demonstra que os esforços foram concentrados e aplicados de forma correta. Resumindo, o gráfico mostra que, quando do início de controle de contaminação, em 1999,

por contagem de partículas, o fluido novo fornecido continha aproximadamente 8.000 partículas por mililitro de fluido para partículas maiores ou iguais a $5\mu\text{m}$, ou seja, mais de 10 vezes fora do objetivo. Após as melhorias identificadas e implementadas no fornecedor e no transporte, a partir do ano de 2001, o nível de limpeza atingido foi o ideal ISO16/13, ou seja, igual ou menor que 640 partículas por mililitro de fluido para partículas maiores ou iguais a $5\mu\text{m}$ (código 16), e igual ou menor que 80 partículas por mililitro de fluido para partículas maiores ou iguais a $15\mu\text{m}$ (código 13), mantendo-se estável com o decorrer do tempo, mostrando, assim, a estabilidade e a robustez do processo implantado. A robustez do processo de fornecimento do fluido novo pode ser observada através dos anos, onde atualmente o nível de limpeza do fluido novo é em média ISO14/11.

Figura 36 - Monitoramento do fluido novo recebido do fornecedor

Essa melhora no nível de limpeza do fluido trouxe outras melhorias para o processo, observando-se um aumento considerável na vida útil dos elementos de filtro. Isso teve impacto positivo no processo, através da redução do custo operacional com a filtragem dos fluidos. Em média, os elementos de filtros utilizados para descarregamento, antes da melhoria do processo, eram substituídos uma vez por mês; após a implementação da melhoria, passaram a ser substituídos com uma frequência de seis meses. Por outro lado, os filtros utilizados nos pontos de enchimento tiveram sua vida útil estendida de seis

para dezoito meses. Além da redução do custo de processo, também pode ser observada uma maior estabilidade no nível de limpeza do fluido nos pontos de enchimento. Na Figura 37 é visível o quanto de redução se obteve com o recebimento de fluido mais limpo do fornecedor.

Figura 37 – Período de troca de elemento de filtro x custo de troca

Em adição, os processos de fabricação dos componentes que fazem parte de transmissão de força dos produtos também tiveram melhorias significativas. Exemplificando, a Figura 38 mostra resultados sobre a limpeza dos reservatórios de fluidos dos produtos. Pode-se dizer que as melhorias efetuadas nesse processo foram de grande valia para a melhoria do nível de limpeza do fluido do produto final.

Após as melhorias efetuadas no processo, atingiu-se um nível de limpeza inferior a 40mg. Antes da implementação das melhorias, observa-se que o nível de contaminação por massa nos reservatórios era maior que 400mg; dessa forma, pode-se considerar que o nível de limpeza obteve uma melhoria maior que 10 vezes.

Como já explorada nesse capítulo, a participação do homem nesse processo é fundamental. Para medir essa participação e o comprometimento das pessoas envolvidas nesse processo, foi desenvolvida uma avaliação de

processo, com o objetivo de fazer um acompanhamento mensal das atividades pertinentes à fabricação e montagem.

Essa avaliação englobou basicamente as atividades relacionadas com a embalagem e proteção dos componentes no ponto de uso e em processo; conscientização com relação à análise visual de componentes para identificar sujeira e oxidação; condições de limpeza do local de trabalho; conhecimento do homem com relação à contaminação, limpeza de fluidos e outros.

Figura 38 - Nível de limpeza de reservatórios hidráulicos

Assim, essa medição se torna muito importante, sendo utilizada como um instrumento para o monitoramento do processo, podendo ser observada na Figura 39. Analisando os resultados, pode-se afirmar que os trabalhos relativos a treinamento e conscientização foram explorados corretamente, atingindo-se um índice esperado de conformidade. Isso mostra que de fato existiu uma mudança no comportamento das pessoas, através da quebra de paradigmas de que falamos no capítulo anterior. Observa-se de fato que as pessoas passaram a trabalhar de forma correta, ou seja, mantendo o local de trabalho limpo, as peças embaladas corretamente até o momento da montagem final e também usando as ferramentas e processos adequados. O percentual de conformidade significa que a grande maioria dos envolvidos com esse processo seguem a risca o método planejado.

Figura 39 - Resultado de avaliação de processo

As iniciativas referidas foram à base para melhorar o nível de limpeza do fluido para o embarque do produto para o cliente. É possível observar que, nos períodos em que ocorreram as melhorias nos processos, também ocorreram melhorias no nível de limpeza de fluido do produto, havendo, assim, uma forte correlação entre eles. É importante ressaltar que a limpeza no fluido foi analisada através de contagem de partículas. A Figura 40 mostra a melhoria efetiva dos fluidos de embarque dos produtos.

Figura 40 - Nível de limpeza do fluido por contagem de partículas para embarque do produto

Manter o processo sob controle significa melhorar à confiabilidade dos produtos, que pode ser medida através do número de defeitos causados por problemas de contaminação e seu custo efetivo. Na Figura 41 é possível

visualizar a evitação de despesas com problemas ocorridos por contaminação de sistemas de transmissão de força.

Figura 41 - Evitação de garantia do produto por problemas de contaminação

O controle de contaminação por contagem de partículas dos fluidos de transmissão de força é uma necessidade que deve ser estendida a todos os revendedores e clientes, pois, para se manter o fluido em níveis ideais de limpeza, são necessárias à participação e a conscientização de toda a cadeia de processo.

3. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos mostram a eficiência do controle da contaminação em todas as fases dos processos, desde o nível de limpeza do fluido de enchimento até o fluido de embarque do produto, sendo:

- Controle do fluido novo por contagem de partículas
- Controle do fluido do produto por contagem de partículas
- Controle nos processos de testes e montagem dos conjuntos

Mostra também a importância de se manterem os níveis de contaminação sob controle durante todas as etapas do processo fornecendo subsídios para validar que os esforços despendidos para a melhoria nos processos relacionados com o controle de contaminação foram direcionados corretamente. Através do uso da técnica de contagem de partículas esse controle é possível devido a:

- Resultado da análise é em tempo real
- Tomada rápida de decisão

Numa comparação simples das melhorias ocorridas no processo após a implantação do controle de contaminação, pode-se afirmar que o nível de limpeza do fluido em todo o processo melhorou em mais de 10 vezes, reduzindo o número de falhas nos produtos, reduzindo os seus custos operacionais, aumentando a disponibilidade das máquinas para trabalho no campo, melhorando a percepção do cliente quanto à imagem e confiabilidade do produto e evitando gastos com pagamento de garantias.

Essas avaliações e resultados puderam ser obtidos por meio das análises de contagem de partículas, o que demonstra ser:

- A análise ideal para medição da contaminação do fluido
- Consistente
- Confiável
- Medição de qualquer tipo de partícula

- Medição do tamanho partícula entre 2 à 100mm• Melhoria significativa dos resultados

3.1 Trabalhos futuros

3.1.1 Estudo da contaminação gerada por atrito

Embora a quantidade de falhas com deslizamento de cilindros hidráulicos e travamento de válvulas tenham sido reduzidos significativamente, continua-se a registrar ocorrências com esse tipo de falha, mesmo tomando-se os devidos cuidados com cada uma das etapas do processo de fabricação e montagem do produto, garantindo o nível de limpeza ideal do fluido por contagem de partículas. Estas podem ser atribuídas à contaminação do sistema de transmissão de força gerada pelo atrito nas linhas de condução dos fluidos, mais especificamente nas roscas das conexões que unem tubos e mangueiras a outros componentes do sistema, que poderá gerar mais ou menos contaminantes, dependendo da quantidade de uniões feitas no sistema e da interferência nas roscas durante o aperto.

Muitas dessas conexões estão posicionadas nas entradas e saídas das válvulas e cilindros, e toda contaminação gerada durante o processo de aperto irá para dentro desses conjuntos, podendo causar a falha. Para entender melhor esse fenômeno, faz-se necessário avaliar o volume e os tamanhos das partículas geradas e também ao tamanho da folga entre os componentes internos das válvulas e cilindros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AEROSPACE STANDARD. Aerospace- Cleanliness Classification for Hydraulic Fluids. **SAE AS 4059B**. 1995.

AEROSPACE RECOMMENDED PRACTICE. Procedure for Calibration and Verification of a Liquidborne Particle Counter: An Absolute Standard. **SAE ARP1192**. November 1991.

AEROSPACE RECOMMENDED PRACTICE. Procedure for the Determination of Particulate Contamination in Hydraulic Fluids by the Control Filter Gravimetric Procedure. **SAE ARP 785**. April 1996.

AEROSPACE RECOMMENDED PRACTICE. The Determination of particle Contamination in Liquids by the Particle Count Method. **SAE ARP 598B**. 1986.

ANSI. Hydraulic Fluid Power. In-Line Automatic Particle Counting Systems. Method of Validation. **B93.73M-1986** .R1995.

ANSI. Hydraulic Fluid Power - Fluid Sample Containers - Qualifying and Controlling Cleaning Methods. **B93.20**. 1972, R 1988.

ANSI. Hydraulic Fluid Power- Method for Determining the Particle Count of an Oil Sample from a System (Using Liquid Automatic Counters). **ANSI/(NFPA) T2. 9.11-1989**. R.1995.

ANSI. Hydraulic Fluid Power- Particulate contamination Analysis- Extraction of Fluid Samples from Lines of an Operation System. **ANSI. B93. 19M**. 1972. R1993.

ANSI. Hydraulic Fluid Power. Contamination Analysis Data. Reporting Method. **ANSI B93.30**. 1987.

ANSI. Hydraulic Fluid Power. Determination of Solid Contaminant Level by Gravimetric Method. **ANSI/ (NFPA) T2**. 9.14-1993.

ASTM Test Method for Insoluble Contamination of Hydraulic Fluids by Gravimetric Analysis. **ASTM 4898**. 1990.

ASTM. Standard Test Method for Evaluating Wear Characteristics of Tractor Hydraulic Fluids- **ASTM D4998**. 1995.

BAUR, P.S. **Ferrography**: Machinery-Wear Analysis a Predictible Future, 1982.

BENSCH, Leonard E. **Dirt Capacity**: The Overrated Filter Rating Factor, 1984, June, 23.

BENSCH, Leonard (2000). **How the New ISO Particle Count Standard Will Affect You**, (On-line). Available: (disponível): <http://www.noria.com/Poa/May00/iso1.html>. 2001, Jan.19.

BOOSER, E. Richard. **CRC Handbook of Lubrication and Tribology**. Boca Ranton: 1994. (Apostila).

BUTLER, P.B.; LUERKENS, D.W. **Influence of particle Shape on Size Measured by the Light-Blockage Technique**. Powder Technology, 54 (1988) 99-105, Elsevier Sequoia/Printed in the Netherlands.

Calibration and correlation problems for liquid-measurement OPCs – A Lieberman- Particle Measuring Systems, USA, 1992. p. 517-523. Proc.11. **II Symp. Int. Confederation of Contamination Control Societies**. London.1992.

CATERPILLAR, Inc.. **Hydraulic Systems Management Guide**. Mossville: 1999. (Apostila).

Contamination in Fluid Power Systems, Conf. Public, University of Bath, September 5-6, 1984- Inst. Mech. Eng C255/84. **The characteristics of practical systems.** M J Day, BSc, Pall (Europe), Portsmouth.

COWAN, Richard S. Monitoring Technology for Condition-Based Maintenance - A collection of papers at the 1996. **ASTM/STLE International Tribology Conference.**

CSIKAI, Nicholas J.; SCHWARE Thomas D.; BAKER, J.T. **Modification of the Hiac/Hoyco Particle-Counting System for Sample Transport Via Pressure.** Research and Development Department. Phillipsburg, NJ, 1987.

DAVES, Glenn G. et al. **Morphology Descriptors of Irregularly Shaped Particles from Two-Dimensional Images.** University Illinois Aerosol Science and Technology 19: 199-212 (1993). Elsevier Science Publishing.

DIN Test Method for Particle Analysis in Liquids: Determination of Particles with Optical Particle Counter. **DIN 50452.** Part 2, (1991).

ELEFThERAKIS, J.G., Contaminant sensitivity Assessment of Electrohydraulic Valves. **SAE 89167.**

ELEFThERAKIS, John G.; Determining Valve contaminant Sensitivity Effect Using Two Contaminants. **SAE n° 91060.** Proc. 42nd Earthmoving Industry Conference, Peoria IL. 1991, Apr. 9-10.

ELEFThERAKIS, John G.; KHALIL, Abraham. SAE Technical Papers – 932440 - Understand the Multipass Filter Beta Test **International Off-Highway & Powerplant Congress & Exposition Milwaukee.** Wisconsin, 1993.

ELEFThERAKIS, John G.; **A primer on particle counting.** 1992. p. 34-36.

FITCH, E.C. **Control of hydraulic fluid contamination.** Part 3: Restricting infiltration of contamination. May 1983.

HARTSUCH, Paul. **Akzo Nobel Chemicals Inc.** Filtration and Particle Contamination Control 1997, May, 27.

HEILBRUNN G. D. **Total Cleanliness Control: A cost savings Strategy for mobile equipment manufacturers and users.** SAE Technical Paper Series 932439. International Off-Highway & Powerplant Congress & Exposition Wiscosin, September 13-15, 1993.

HOLM, Christopher E. **Cleanable Hydraulic and Engine Lubricating Oil Filters for Off-Road Applications.** SAE Technical Papers 961830. International Off-Highway & Powerplant Congress & Exposition Indianapolis. Indiana, 1996.

HOLM, Christopher E. et al. SAE Technical Papers 961834. **Cleanable Hydraulic and Engine Lubricating Oil Filters for Off-Road Applications.** International Off-Highway & Powerplant Congress & Exposition Indianapolis. Indiana. 1996.

HUMPHREY, J. A. C. **Fundamentals of fluid motion in erosion by solid particle impact.** California, Int. J. Heat and Fluid Flow, v. 11. n. 3. 1990. p. 170-195.

HYDAC International. **Principles and Applications of Hydraulic Filters.** Sulzbach: 2000. (Apostila).

INOUE, R. **Contamination effects:** look what happens to proportional valves. Hydraulic & Pneumatics. 1992

ISO. Hydraulic fluid power – Calibration of automatic particle counters for liquids. **ISO 11171.** 2001-10-01.

ISO. Hydraulic Fluid Power- Filters - Evaluation of Pressure Drop Versus Flow characteristics. First Edition. **ISO 3968.** 1981.

ISO. Hydraulic Fluid Power – Fixed Displacement Pumps- Flow Degradation due to Classified AC Fine Test Dust Contaminant- Test Method First Edition. **ISO 9632**. (1992). The NFPA identification is NFPA T3.9.18. R.1994.

ISO. Hydraulic Fluid Power – Fluid Contamination- Determination of Particulate Contamination by the Counting Method Using a Microscope. First Edition. **ISO 4407**. 1991.

ISO. Hydraulic Fluid Power – Fluids - Method for coding level of contamination by solid particles – **ISO 4406**. 1999.

ISO. Hydraulic Fluid Power- Calibration of Automatic Particle-Count Instruments for Particles Suspended in Liquids- Method Using Classified AC Fine Test Dust Contaminant – Second Edition **ISO 4402**. 1991.

JOHNSTON, P. R. **The Most Probable Pore-Size Distribution of Fluid Filter Media.1. Evidence of Such a Distribution from Results of Extended Bubble-Point Measurements.** Journal of Testing and Evaluation. 11(2): 117-121. 1983.

JOHNSON, Milton D. et al. SAE Technical Papers 942028. **In-Service Engine Oil Condition Monitoring - Opportunities and Challenges.** Fuels & Lubricants Meeting& Exposition. Baltimore, Maryland, 1994.

JUHASZ, C. **Filter performance: Myth and Reality – Practical Aspects of Filter Testing, Filtration and Separation,** 20(1):28-31. 1983.

KAYE, Brain H. **Describing Filtration Dynamics from the Perspective of Fractal Geometry.** Sudbury, Ontario. P3E 2C6- 1991- Kona n°9. p. 218-237.

KING, R. K.; TESSMANN, R.K.; BENSCH, L.E. **Fluid Power Research Conference Oklahoma State University Ingression Rates – Actual Field Measurement-** Paper N° P76-27. October 5-7, 1976.

KITZMILLER D.; GEISE, S.; TESSMAN, R. K. **Fluid Power Research Conference Oklahoma State University**. The effect of contaminant Hardness on wear Paper No. P76-30 October 5-7,1976.

KNAPP, Julius Z. **Particulate Matter Counting: The Technical Issues**. Research & Development Associates, Inc., Somerset, New Jersey, p. 2-8.

KNOLLENBERG, Robert G.; VEAL, Donald L. **Optical Particle Monitors, Counters and Spectrometers: Performance Characterization, Comparison and Use**. Particle Measuring Systems, Inc.- Boulder,Colorado- Journal of the IES- 1992- p. 64-81.

KUELHN, T.H.; LIU, B. Y. H. **Simulation of Flows and Contaminant Transport in Liquids Tanks**. 1993 - Proceedings - Institute of Environmental Sciences. p. 396-406.

LIN, Z.L. **An Investigation on the Breakout Force of Piston Components - Part 2: Contaminant Lock**. The BFPR Journal. 1985. v. 18, n. 1. Oklahoma, p. 191-200.

LUCKHAM, P.F. **An Invited Review: The Measurement of Interparticle Forces**. Powder Technology, 58 (1989) 75-91, Elsevier Sequoia/Printed in the Netherlands.

MEYERS, C.H. **Keeping Tabs on Oil Cleanliness**. Machine Design. May 23, 1985.

MILWAUKEE, W.I. **Proc. SAE International Off-Highway & Powerplant Congress**. 1989, Sept 11-14.

MIRSHAWAKA, Victor. **Caminho Para Zero Defeitos**. 1ed., SP: McGraw Hill, 1991.

MOBLEY, R. Keith. **An Introduction to Predictive Maintenance**. 1. ed. Knoxville: Van Nostrand Reinhold, 1943.

NFPA. **Method of Establishing the Speed Degradation of Hydraulic Fluid Power Motors when Exposed to Particulate Contaminant: Appendices X, Y, and Z.** T3.9.25. 1994.

NIXON, Harvey P. **Assessing the Detrimental Impact of Lubricant Formulations and Debris Contamination on Tapered Roller Bearing Performance Characteristics.** SAE Technical Papers 961830 .International Off-Highway & Powerplant Congress & Exposition. Indiana, 1996.

NIXON, Harvey P. et al. **Earthmoving Industry Conference and Exposition.** Illinois, April 8-9, 1998.

NIXON Harvey P. **Debris Signature Analysis (SM):A method for Assessing the Detrimental Effect of Specific Debris Contaminated Lubrication Environments.** SAE Technical Paper Series 981478. Illinois, April 8-9, 1998.

NORVELLE, F.D. **Designing for contamination control in fluid power systems.** The BFPR Journal. Volume 17, número 2. 1984.

OFF-HIGHWAY MACHINERY PRACTICE. **Reporting Cleanliness Levels of Hydraulic Fluids. SAE J1165.** March 1986.

PALL Industrial Hydraulics. **Controle de Contaminação em Sistemas Hidráulicos BEPIH68.** São Paulo: 1990. (Apostila).

PARK, R. W. (1997). **Contamination Control A Hydraulic OEM Perspective,** (On-line). Available: (disponível): <http://www.moog.de/company/australia/contamination.htm>. 2001, Mar.01.

PAVIAT, Mark R.; CANIL, Jeffrey J. **New contamination control techniques for paper machine lubricating and Hydraulic Systems.** 1985. Tappi Journal. p. 76-80.

PETRUK, W.; SKINNER H.C.W. **Characterizing Particles in Airborne Dust by Image Analyses.** JOM. April 1997.

RAASCH, Jurgen; UMHAUER, Heinz. **Error in the Determination of Particle Size Distributions Caused by Coincidences in the Optical Particle Counts.** June 1984 - Paper Charact. 1. p. 53-58.

ROCCO, M.C.; ADDIE, G.R. **Erosion Wear in Slurry Pumps and Pipes 1986.** Elsevier Sequóia. Printed in The Netherlands, 1987 (USA). 35-46.

SANTOS, Tarcisio A.D.A. Baroni. **Controlando o Desgaste de Máquinas.** São Paulo: 1999. (Apostila).

SCHROEDER, Hans G.; DELUCA, Patrick P. **Theoretical Aspects of Particulate Matter Monitoring by Microscopic and Instrumental Methods.** University of Kentucky , Lexington, Kentucky 1980, V. 34. n. 3, p. 183 –191.

SOMMER, Holger T. **Counting Statistics and Sensitivity of Optical Particle Counters.** Met One, Inc. Institute of Environmental Sciences. P. 32-33.

SOMMER T. Holger. **Machine Condition Monitoring: Definition of an Oil Condition Index.** SAE 2002-01-1354 NCFP I02-1.4 - TEAM Service, Inc. March 2002.

SULPICE, Pierre. **Extending Proportional and Servo Valve Life by Controlling Contamination.** East Hills: 1994. (Apostila).

SURFACE VEHICLE STANDARD. Method for Assessing the Cleanliness Level of New Hydraulic Fluid, **SAE J1277.** July 1990.

TOTTEN, George E. **Handbook of Hydraulic Fluid Technology.** Union Carbide Corporation Tarrytown, New York: Marcel Dekker, Inc.- ISBN: 0-8247-6022-0- 2000.

TOTTEN George E. et al. **Bench Testing of Industrial Fluid Lubrication and Wear Properties Used in Machinery Applications.** Library of Congress Cataloging in Publication Data. ASTM Stock Number: STP1404- ISBN 0-8031-2867-3. Printed in Baltimore, MD- April 2001.

VERDEGAN, Barry M.; FLEETGUARD, Nelson. **Reprinted from: Fluid power for Off-Highway Applications (SP-1380)**. International Off-Highway and Powerplant Congress and Exposition Milwaukee. Wisconsin, September 14-16, 1998.

VERDEGAN, Barry M. **NIST Traceable Particle Counter Calibration Standard- Contamination Control Enters the Next Century**. SAE TECHNICAL PAPER SERIES 981970. Wisconsin, September 14-16, 1998.

VICKERS Sperry. **Manual de Hidráulica Industrial 935100-A**. 3. ed. São Paulo: Ipiranga, 1977.

VLASOV V.M.; NECHAEV, L.M.; FOMICHEVA, N.B. **A ferrographic method for wear diagnostics of High-strength Materials** -Vol.65. NO. 5- 1999- Industrial Laboratory: Diagnostics of Materials, p. 319-321.

WANKE, Thomas S. **Contamination Sensitivity of Mobile Hydraulic Proportional Valves**. SAE Technical Paper Series 910961. 42nd Earthmoving Industry Conference. Peoria, Illinois.

YUANG, Cherneg Chiou et al. **An on-line Hall-effect device for monitoring wear particle in oils**. 1998. Elsevier Science. P. 44-49.