

MURILO CARDOSO SILVESTRE

SISTEMAS DE FILTRAGEM APLICADOS EM PROCESSOS FABRIS
AUTOMOTIVOS

Guaratinguetá

2014

MURILO CARDOSO SILVESTRE

**SISTEMAS DE FILTRAGEM APLICADOS EM PROCESSOS FABRIS
AUTOMOTIVOS**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Magalhães
Sobrinho

Guaratinguetá

2014

S587s	Silvestre, Murilo Cardoso Sistemas de filtragem aplicados em processos fabris automotivos / Murilo Cardoso Silvestre – Guaratinguetá, 2014. 108 f : il. Bibliografia: f. 107
	Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014. Orientador: Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho
	1. Filtros e filtração 2. Usinagem I. Título CDU 66.067



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

MURILO CARDOSO SILVESTRE

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. WAGNER FORTI
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. PEDRO MAGALHÃES SOBRINHO

Orientador/UNESP-FEG


Profa. Dra. IVONETE ÁVILA

UNESP-FEG


Prof. Dr. ALEX MENDONÇA BIMBATO

UNESP-FEG

Dezembro de 2014

DADOS CURRICULARES**MURILO CARDOSO SILVESTRE**

NASCIMENTO	09.12.1990– PARAÍSO DO TOCANTINS / TO
FILIAÇÃO	Orlando Silvestre Luzerina Rodrigues Cardoso Silvestre
2009/2014	Curso de Graduação Engenharia Mecânica - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista

de modo especial às pessoas mais importantes da minha vida: meus pais Orlando e Luzerina, minha irmã Bárbara e à minha companheira Nathalie. Sem vocês não haveria motivo de existência.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, por ter me protegido por tantos momentos que passei sozinho nessa caminhada e ser meu eterno e fiel parceiro,

aos meus pais, *Orlando Silvestre* e *Luzerina Silvestre* e irmã, *Bárbara Silvestre*, pelo apoio a todo instante, me motivando, incentivando e dando forças para que nenhum obstáculo fosse maior que minha coragem e força de vontade.

à minha companheira *Nathalie Moura*, pela companhia durante os anos de faculdade, pela compreensão em momentos difíceis e por nunca me abandonar quando pedi por ajuda.

à meus familiares que de alguma forma me ajudaram a conquistar tudo até o presente momento.

à minha eterna República Cevada & Kana e a *Tia Hercilha* pelos seis anos de convivência e aprendizado ao lado de irmãos e amigos que jamais sairão da minha vida.

ao meu orientador, *Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho*, e a todos os meus professores pelos ensinamentos que me tornaram um engenheiro e me preparam para a vida fora da universidade,

às funcionárias da Biblioteca e de toda Graduação do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar.

à General Motors, aos engenheiros e colegas com quem trabalhei que me possibilitaram desenvolver meus conhecimentos e a realização deste trabalho de graduação,

à UNESP Campus de Guaratinguetá – FEG Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, pela oportunidade e companheirismo. Obrigado por TUDO.

“É necessário sempre acreditar que o sonho é possível,
que o céu é o limite e você truta é imbatível”.

(Racionais MC's)

SILVESTRE, M. C. **Sistemas de filtragem aplicados em processos fabris automotivos**. 2014. 109 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

RESUMO

O presente trabalho é resultado de um estudo sobre sistemas de filtragem de coolant presente em fábricas onde possuem operações de usinagem em grande escala. O mercado mundial de filtragem e elemento filtrante movimenta bilhões de reais por ano e possui um futuro promissor na medida em que com a exigência global de um desenvolvimento econômico sustentável, muitas empresas investem em novas tecnologias de filtragem. A filtragem de coolant, fluido refrigerante ou de corte usado para lubrificar e resfriar a peça durante a operação de usinagem se faz necessário devido ao alto volume usado nas diversas operações de usinagem e o alto custo do produto, havendo assim a necessidade de reaproveitá-lo depois de usado. O trabalho mostra a tecnologia e os fundamentos da filtração, assim como diferentes tipos de elementos filtrantes, sistemas de filtragem e classes de contaminação usada na indústria. Diferencia filtragem tipo superfície (torta) do tipo profundidade e apresenta a teoria básica da filtração por meio de modelos matemáticos em diferentes situações de operação. Mostra os critérios de projeto para seleção de um sistema de filtragem de coolant, detalhes técnico-operacionais de um sistema real de filtragem de coolant, do tipo à vácuo e um estudo de caso realizado com o intuito de redução do custo operacional deste sistema.

PALAVRAS-CHAVE: Filtragem. À vácuo. Coolant. Fluido refrigerante. Elemento filtrante. Teoria básica da filtragem. Classes de contaminação. Usinagem.

SILVESTRE, M. C. **Filtration Systems applied in automotive industries process**. 2014. 109 f. Graduate Work (Graduate in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

ABSTRACT

The present work resulted from a study about coolant filtration systems in industries with metalworking process in large scale. The filtration and element filter world markets move billions of Reais per year and have a promissory future considering that with the global requirements of sustainable economic development, many companies invest in new filtering technology. Either known as coolant or cutting fluid, it is used to lubricate e cool parts during machining and is necessary due to the high volume demanded in the several machining operations and to the high cost of the product. Therefore, there is the need for recycling the product after its use. The work shows the technology and fundamentals of filtration as well as different filtering elements, filtration systems and scale contamination used in the industry. Also, there is a differentiation between filtration of the surface type (cake) and depth filtration and shows the basic theory of filtration by mathematic models in different operational conditions. Ultimately, project criteria for a coolant filtration system selection is shown followed by technical-operational details of a real vacuum filtration system and a case study aiming the operational cost reduction of the system.

KEYWORDS: Filtration. Vacuum. Coolant. Cutting fluid. Filter element. Basic Theory of Filtration. Classes of contamination. Metalworking.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Princípio de um sistema de filtração	18
Figura 2 - Classificação geral de equipamentos pelo tipo de descarte e processo de separação	25
Figura 3 - Esquema de filtração do tipo contínuo	26
Figura 4 - Estágios e métodos de separação sólido/líquido	27
Figura 5 - Deposição de partículas na filtração	30
Figura 6 - Efeito do ligante Neoprene na resistência do papel filtro.	36
Figura 7 - Comparação de desempenho de filtração por porcentagem de partícula transmitida ao filtrado	38
Figura 8 - Mecanismos de retenção de partículas	41
Figura 9 - Finas partículas retidas entre fibras	42
Figura 10 - Filtração de Profundidade	43
Figura 11 - Filtração por Torta, Bolo ou Borra	44
Figura 12 - Passagem de partículas anormal	45
Figura 13 - Escala ISO 4406 de nível de contaminantes	47
Figura 14 - Classes NAS 1638 de nível de contaminantes	48
Figura 15 - Comparação entre norma ISO 4406 e NAS 1638	49
Figura 16 - Exemplo de amostras classificadas conforme ISO 4406 e NAS 1638: (a) óleo novo, de tambor ; (b) óleo novo de tanque de caminhão; (c) óleo novo, de mini reservatórios; (d) óleo requerido para instalações hidráulicas	50
Figura 17 - Curva de área filtrante do filtro	53
Figura 18 - Curva variação de temperatura	54
Figura 19 - Efeito do acúmulo de sólidos	54
Figura 20 - Curva variação de temperatura.	55
Figura 21 - Curva fluxo constante e pulsante	56
Figura 22 - Representação de um meio poroso	57
Figura 23 - Representação da porosidade de um meio.	58
Figura 24 - Relação entre perda de pressão e vazão do fluido de um fluido limpo através de um meio poroso fixo.	59
Figura 25 - Esquema ilustrativo de um meio filtrante com torta na superfície.	62
Figura 26 - Declínio da taxa de filtração sob pressão constante	64

Figura 27 - Relação entre volume de filtrado e volume de torta	64
Figura 28 - Resistência específica	66
Figura 29 - Velocidade constante de filtração.....	72
Figura 30 - Variação de pressão durante filtração à velocidade constante	73
Figura 31 - Curva característica típica de bombas centrífugas.....	74
Figura 32 - Inverso da vazão instantânea pelo volume de filtrado	75
Figura 33 - Esquema de um sistema de filtração de coolant.....	80
Figura 34 - Ilustração de um sistema de filtração a tambor rotativo.....	82
Figura 35 - Mecanismo de funcionamento de um sistema de filtração a tambor rotativo	83
Figura 36 - Sistema de filtração a vácuo	87
Figura 37 - Etapa de filtração de um sistema a vácuo.....	87
Figura 38 - Momento em que o vácuo é “quebrado” num sistema de filtração a vácuo.....	88
Figura 39 - Passe do elemento filtrante de um sistema de filtração a vácuo.....	89
Figura 40 - Esquema do modelo sistema de filtração a vácuo com mídia descartável com sistema secundário de filtração de aço inoxidável.....	90
Figura 41 - Princípio básico de funcionamento de um filtro de cartucho da fabricante Boll & Kirch.....	92
Figura 42 - Esquema de um modelo (Automatic back-flushing tipo 6.61) de filtro de cartucho da marca Boll&Kirch utilizado na planta da General Motors	92
Figura 43 – Exemplo de diferentes modelos de cartuchos Boll & Kirch	93
Figura 44 - Modelo de uma vela utilizada no filtro tipo 6.61 (GM-SJC).....	93
Figura 45 - Sistema de filtração à vácuo com mídia descartável (GM-SJC)	95
Figura 46 - Esquema representativo do sistema de filtração à vácuo HV-180-HW da Mann-Hummel.....	95
Figura 47 - Foto de um sistema de filtração do tipo Cartucho com mídia de aço inoxidável (GM-SJC).....	96
Figura 48 - Placa de rolamento (esq) e carcaça da transmissão (dir). Componentes usinados (GM-SJC).....	97
Figura 49 - Tampa do tanque sujo com visualização do coolant (GM-SJC).....	97
Figura 50 - Amostra do tecido #1 (GM-SJC)	98
Figura 51 - Amostra do tecido #2 (GM-SJC)	100
Figura 52 - Economia anual de Manta Filtrante.	101

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Espectro da Separação	23
Tabela 2 - Classificação de tipos de filtração pelo tamanho dos poros.....	28
Tabela 3 - Tipos de elemento filtrante de acordo com o material	32
Tabela 4 - Comparação de propriedades de diferentes tipos de mídia de tecido.....	39
Tabela 5 - Razão Beta e Eficiência de um filtro.....	51
Tabela 6 - Ilustração do tempo requerido para afetar a velocidade e pressão da filtração.....	75
Tabela 7 - Modelo de filtro Self Contained do tipo tambor rotativo com indexação automática e mídia permanente com sistema secundário de filtração opcional de aço inoxidável e estação opcional de refinamento do filtrado	82
Tabela 8 - Modelo de sistema de filtração a vácuo com mídia descartável e filtração secundária com filtros automáticos de aço inoxidável	85
Tabela 9 - Especificação da composição e tamanho dos contaminantes no fluido	86
Tabela 10 - Dados do teste de contagem de partículas no sistema #1	99
Tabela 11 - Dados do teste de contagem de partículas no sistema #2.....	100
Tabela 12- Comparação dos testes de contagem de partículas #1 e #2	102

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ISO	International Standards Organization
NAS	National Aerospace Standard
MF	Micro filtração.
UF	Ultra filtração
NF	Nano filtração
OR	Osmose reversa
TNT	Tecido não tecido

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Resistência específica da torta local	m/kg
β	Relação entre volume de filtrado e volume de torta	-
β_x	Razão Beta	-
ε	Porosidade local	
μ	Viscosidade local	Pa.s
ρ	Densidade do fluido	kg/m^3
ρ_s	Densidade do sólido	kg/m^3
A	Área de filtração	m^2
C	Concentração volumétrica de sólidos	-
C_{wv}	Concentração mássica de sólidos por unidade de volume	kg/m^3
C_{wvl}	Concentração mássica de sólidos por unidade de volume de líquido	kg/m^3
c	Massa de sólido seco por unidade de volume	kg/m^3
K	Constante de Kozeny	-
k	Permeabilidade da torta	m^2
L	Espessura da torta ou “cama”	m
m	Razão entre torta úmida e seca	-
M	Massa total do leito (mistura líquido e sólido)	kg
ΔP	Diferença de pressão (queda de pressão)	N/m^2
ΔP_c	Diferença de pressão sobre a torta	N/m^2
ΔP_m	Diferença de pressão sobre o meio filtrante	N/m^2
q	Vazão de filtração	m^3/s
q_0	Vazão inicial de filtração	m^3/s
R_c	Resistência da torta	$1/\text{m}$

R_m	Resistência do elemento filtrante	$1/m$
s	Fração mássica de sólidos na mistura de alimentação	-
S_v	Área específica de superfície por unidade de volume	m^2/m^3
t	Tempo	s
V	Volume de filtrado	m^3
V'	Volume de filtrado por unidade de área	m^3/m^2
v_s	Velocidade dos sólidos dentro da torta	m/s
w	Massa de sólido depositada por unidade de área	kg/m^2
x	Diâmetro da partícula	m

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS	22
2.1	OBJETIVO GERAL	22
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
3	REFERENCIAL TEÓRICO	23
3.1	TECNOLOGIA DA SEPARAÇÃO	24
3.2	FUNDAMENTOS DA FILTRAÇÃO	29
3.3	ELEMENTO FILTRANTE	31
3.4	MEIOS ADSORVENTES, ABSORVENTES E BIOLÓGICOS.....	33
3.4.1	Meio absorvente	33
3.4.2	Meio adsorvente	33
3.4.3	Meio biológico	34
3.5	MÍDIAS DE PAPEL	35
3.6	MÍDIAS DE TECIDO	37
3.7	TECIDO MONOFILAMENTO SINTÉTICO.....	39
3.8	MÍDIAS DE TECIDO NÃO TECIDO.....	40
3.9	FILTRAGEM SUPERFÍCIE X PROFUNDIDADE	40
3.9.1	Superfície x Profundidade	42
3.10	ESCALA DE FILTRAGEM	44
3.10.1	Escala absoluta.....	45
3.10.2	Escala nominal	46
3.10.3	Escala ISO 4406	46
3.10.4	Escala NAS 1638	48
3.10.5	ISO 4406 x NAS 1638	49
3.11	RAZÃO BETA B_x	50

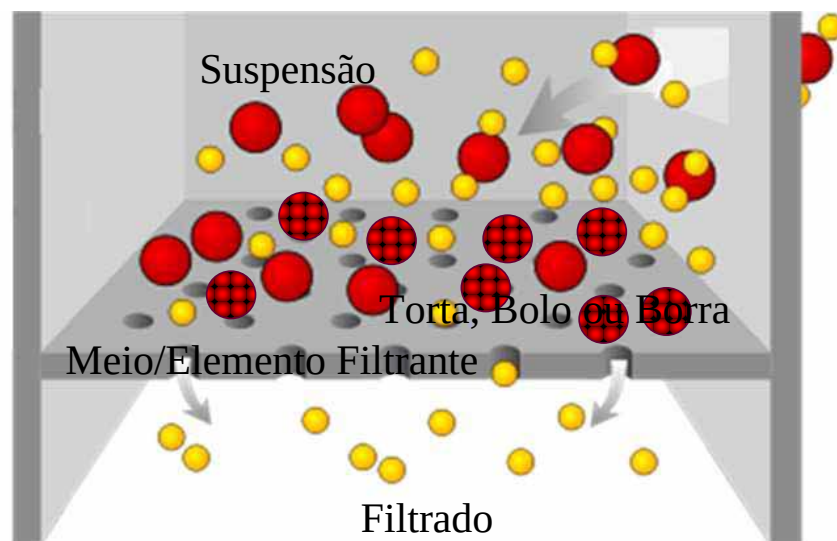
3.12	EFICIÊNCIA DO FILTRO	51
3.13	PERMEABILIDADE DO FILTRO	52
3.14	EFEITO DE UM FLUXO PULSANTE	56
3.15	TEORIA BÁSICA DA FILTRAÇÃO.....	57
3.15.1	Fluxo de fluido através de um meio poroso.....	57
3.15.2	Permeabilidade	60
3.15.3	Filtragem de torta	61
3.15.4	Quantidade de torta depositada por unidade de área e resistência específica	64
3.15.5	Concentração de Sólidos	66
3.15.6	Tipos de equações para filtragem de torta	69
3.15.6.1	Filtragem à Pressão Constante.....	70
3.15.6.2	Filtragem à Velocidade Constante.....	71
3.15.6.3	Filtragem à pressão e velocidade variável	73
3.16	SISTEMAS DE FILTRAGEM DE COOLANT EM OPERAÇÕES DE USINAGEM	75
3.17	TRATAMENTO DE COOLANT A BASE DE ÁGUA	77
3.18	PROJETO DE SISTEMAS DE FILTRAGEM DE COOLANT	78
3.19	TIPOS DE SISTEMAS DE FILTRAGEM DE COOLANT	79
3.19.1	Sistema individual de filtragem.....	80
3.19.2	Sistema central de filtragem	83
3.20	FILTROS CARTUCHO DE AÇO INOXIDÁVEL	91
3.20.1	Filtros automáticos com retro lavagem (Automatic Back-flushing filter)	91
4	ESTUDO DE CASO	94
4.1	INTRODUÇÃO.....	94
4.1.1	Sistema principal de filtragem.....	94
4.1.2	Sistema secundário de filtragem	95
4.1.3	Processo de usinagem	96

4.1.4	Fluido de corte (Coolant)	97
4.2	DADOS ATUAIS	98
4.2.1	Elemento filtrante #1	98
4.2.2	Teste de contagem de partículas #1	98
4.3	NOVA CONFIGURAÇÃO	99
4.3.1	Elemento filtrante #2	99
4.3.2	Teste de contagem de partículas #2	100
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	101
6	CONCLUSÃO	104
	REFERÊNCIAS	105
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	107

1 INTRODUÇÃO

Nos termos mais simples, filtragem é uma operação unitária¹ designada a separar partículas suspensas de um fluido através da passagem deste por um meio ou membrana porosa. Como o fluido ou suspensão é forçado a passar através de espaços vazios ou poros de um elemento filtrante, as partículas sólidas (nomeada torta de filtração) são retidas na superfície do elemento filtrante ou nas paredes dos poros e o líquido resultante após esta passagem é denominado filtrado. (CHEREMISINOFF, 1998, p. 01, tradução nossa).

Figura 1 - Princípio de um sistema de filtragem



Fonte: Adaptado da (UNICAMP, 2012)

A filtragem é uma prática de engenharia histórica e importante até os dias atuais. Antigos médicos sânscritos² e escritos Egípcios citam claramente que processos de filtragem eram usados para tratamento de água por volta do ano 200 a.C, como detalhado no livro “The Quest for Pure Water” (1949). (TIEN; RAMARAO, 2007, p.01, tradução nossa).

Nos dias atuais raramente existe alguma atividade humana, industrial, comercial ou doméstica que não seja afetada pela filtragem. A filtragem está por toda a nossa volta, desde o primeiro café coado pela manhã, o macarrão no escorredor, a água proveniente do popular filtro de cozinha, o ar condicionado que resfria o ambiente até o fato de lavar o chão de casa forçando a água atingir ralos que retêm partículas sujas. No caminho para o serviço ou escola ao dirigir automóveis diversos filtros são usados como o filtro de ar, filtro de combustível e

¹ Na engenharia química e seus campos isolados, representa uma etapa básica de um processo.

² Nome de uma língua antiga que foi utilizada na Índia.

filtro de óleo. Um ambiente onde filtros são comumente vistos e usados são laboratórios com seus clássicos filtros de papel e funil. A filtração³ industrial difere da de laboratório ou das demais citadas somente pelo volume de material operado e na necessidade de ser realizada a baixo custo.

Na indústria automobilística, diversos sistemas de filtragem são utilizados tanto no interior do automóvel quanto nos processos para fabricação de componentes como o motor e a transmissão. Um setor que exige grandes sistemas de filtragem é a manufatura de Powertrain⁴ que inclui fabricação do motor e transmissão. A necessidade ocorre devido ao fato de ocorrer etapas de usinagem de metais como ferro ou alumínio e estas utilizarem fluidos denominados coolant⁵ para a realização de diversas operações. O uso de coolant em processos de usinagem ocorre devido a pelo menos três princípios básicos: remoção de calor, lubrificação e transporte de metal removido.

O uso de fluido de corte é um exemplo típico de sistema tribo mecânico⁶, onde diversos fatores de desgaste estão presentes simultaneamente. As partículas metálicas presentes no coolant tem formato de cavaco, fagulhas, etc. A composição, quanto à forma e tamanho, dos particulados varia significativamente de acordo com o tipo de usinagem e do processo realizado. Durante o processo de corte, o fluido de trabalho também está exposto a alterações devido a reações químicas entre suas substâncias, superfícies de ferramentas e peças de trabalho, a presença de partículas e as temperaturas elevadas nas superfícies de contato. E devido a estes contaminantes existe a necessidade de filtrar o coolant após os processos para que este possa ser reutilizado, já que o consumo é alto e representa um custo elevado para a fábrica. Assim investe-se muito em sistemas de filtragem para que o uso do fluido seja prolongado ao máximo a fim de abaixar o preço de custo do processo de fabricação. (RAKIĆ; RAKIĆ, 2001, p. 01, tradução nossa).

Estima-se que o mercado mundial de equipamentos de filtração e sedimentação em 2007 foi da ordem de 38 bilhões de dólares, e expandindo a uma taxa superior ao da economia global. O negócio é dominado pelo processamento de líquidos, o que representa cerca de 84% do mercado mundial de equipamentos e máquinas de separação. (SUTHERLAND, 2008, p. 05, tradução nossa).

³ Refere-se ao ato de filtrar.

⁴ O Powertrain de um carro é composto de muitos componentes, incluindo o motor, transmissão, eixo motor e qualquer um dos trabalhos internos do motor

⁵ Líquido de arrefecimento que flui através ou em torno de um dispositivo para impedir o seu sobreaquecimento, dissipando o calor produzido pelo dispositivo.

⁶ Tribologia é a ciência e tecnologia da interação de superfícies em movimento relativo e assuntos e práticas relacionados.

Outro mercado de grande valor associado à filtração é o dos elementos filtrantes. Estima-se que globalmente o mercado movimentou 21 bilhões de dólares em 2007 para todos os tipos de mídia existentes e que este numero cresce cerca de 5,5% por ano. Este mercado é considerado até o ponto onde a mídia filtrante esta pronta a ser inserida no filtro (etapa 5 descrito a seguir). Cinco etapas principais são observadas na indústria:

- 1- Fabricante da matéria-prima a partir do qual o meio deve ser feito: um fio de metal, um fibra natural ou sintética, de um pó de cerâmica, de um filamento de plástico extrudido, entre outros;
- 2- Pré-trabalho da matéria-prima para uma forma que já possam ser usados na construção direta das mídias filtrantes como a fiação de fibras por torção dos filamentos, crimpagem⁷ de fios metálicos, entre outros;
- 3- Pré- formação do meio: através da tecelagem tecido ou monofilamento, moldagem e sinterização de plásticos, fibras metálicas ou pó, produção de papel, preparação e processamento de folhas de membranas (processos sem necessidade de acabamento posterior);
- 4- Retrabalho do meio em tamanhos e formatos comerciais característicos para posterior inserto nos filtros;
- 5- Manufatura do filtro, incluindo a instalação ou adaptação do meio para sua posição no filtro.

A sexta etapa, os distribuidores ou vendedores, representam o ultimo estágio servindo o consumidor final, mas que esta etapa pode coexistir entre estágios anteriores. (SUTHERLAND, 2008, p. 43, tradução nossa).

Atualmente existe uma grande preocupação sobre a preservação do meio ambiente frente ao desenvolvimento econômico e as influências da humanidade para que haja um desenvolvimento sustentável. Diversas organizações mundiais já alertam sobre o aquecimento global e as causas deste, levando a humanidade a realizar alterações na forma como o desenvolvimento econômico e a forma de se viver são conduzidos.

Neste contexto as legislações ambientais e órgãos fiscalizadores são importantes direcionadores do mercado de filtração que engloba tanto fabricação do meio quanto do filtro em si. Com exigências de minimização de resíduos e tratamento destes antes do descarte final na natureza, muitos fabricantes investem em pesquisas e desenvolvimento de novas

⁷ É o ato de juntar dois pedaços de metal ou outro material, como por exemplo plástico, através da deformação de um ou ambos para segurar o outro.

tecnologias de forma que atenda as exigências ambientais e ao mesmo tempo financeiramente atraentes para a indústria.

O capítulo três deste trabalho inicia-se com um referencial teórico sobre o tema filtração em geral. É explicado a tecnologia da separação bem como os fundamentos e os tipos de meios filtrantes existentes. É diferenciado os tipos de filtração de superfície e de profundidade, é mostrado as escalas quantitativas que existem neste contexto bem como alguns parâmetros de desempenho. Assim como a teoria básica da filtração por meio de modelagem matemática para as situações de filtrações mais comuns. E por fim o capítulo mostra os tipos de sistemas de filtração de coolant e sistemas secundários de filtração comumente usados na indústria e seus critérios de seleção.

No capítulo quatro é apresentado o estudo de caso realizado numa fábrica com o intuito de reduzir o custo operacional de um sistema de filtração de coolant a vácuo por meio da troca do elemento filtrante utilizado. Mostra-se dados operacionais e fotos reais do sistema e componentes.

Por fim, nos capítulos cinco e seis, são apresentados os resultados, com base em testes de partículas realizados por um laboratório, e a conclusão do trabalho realizado, respectivamente.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Apresentar sistemas de filtrações aplicados em processos fabris automotivos e mostrar casos reais de filtração numa fábrica de motores e transmissão.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar os princípios básicos da filtração e mostrar seus diferentes tipos, classificações, componentes e peculiaridades.
- Apresentar sistemas reais de filtração de coolant existentes em fábricas automotivas na fabricação de motores e transmissão numa grande montadora da região.
- Mostrar estudo de caso, na tentativa de reduzir o custo operacional de um sistema regional de filtração de coolant a vácuo, com dados de instalação, operação e manutenção.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Em outros termos, filtração é apenas uma forma de separação que se refere ao ato de separar uma ou mais fases distintas de outra num processo que existem diferenças físicas entre as fases tais como tamanho de partículas, densidade e até cargas elétricas. Um espectro de separação entre fases é descrito na Tabela 1.

Tabela 1 - Espectro da Separação

Espectro da Separação	
Fases Completamente Misturada	Mecanismo
Vaporização	Destilação Evaporação Sublimação
Condensação	
Sorção	Adsorção Absorção
Mudança de fase	Difusão Lixiviação e Extração
Fases distintas	
Sólido e Sólido	Blindagem e Elutriação Classificação
Sólido e Líquido	Filtração Sedimentação Flotação Precipitação Eletrostática
Líquido e Líquido	Sedimentação Coalescência
Líquido e gás	Desembaciamento Sedimentação
Gás e líquido	Espumação Sedimentação

Fonte: Adaptado de (SUTHERLAND, 2008)

Este trabalho focará o mecanismo de filtração de fases distintas sólido/líquido, apesar de que os demais mecanismos de separação podem coexistir em alguns sistemas de filtração.

O filtro é basicamente um dispositivo para separar uma substância de outra, e para fazer isto requer a colocação de um meio no caminho do fluido, de modo a capturar de alguma forma os sólidos no percurso.

Separação do tipo sólido/líquido envolve o maior leque de tipos de filtros desde simples filtros de cartucho e velas até complexos sistemas tais como filtro de tambor rotativos à vácuo.

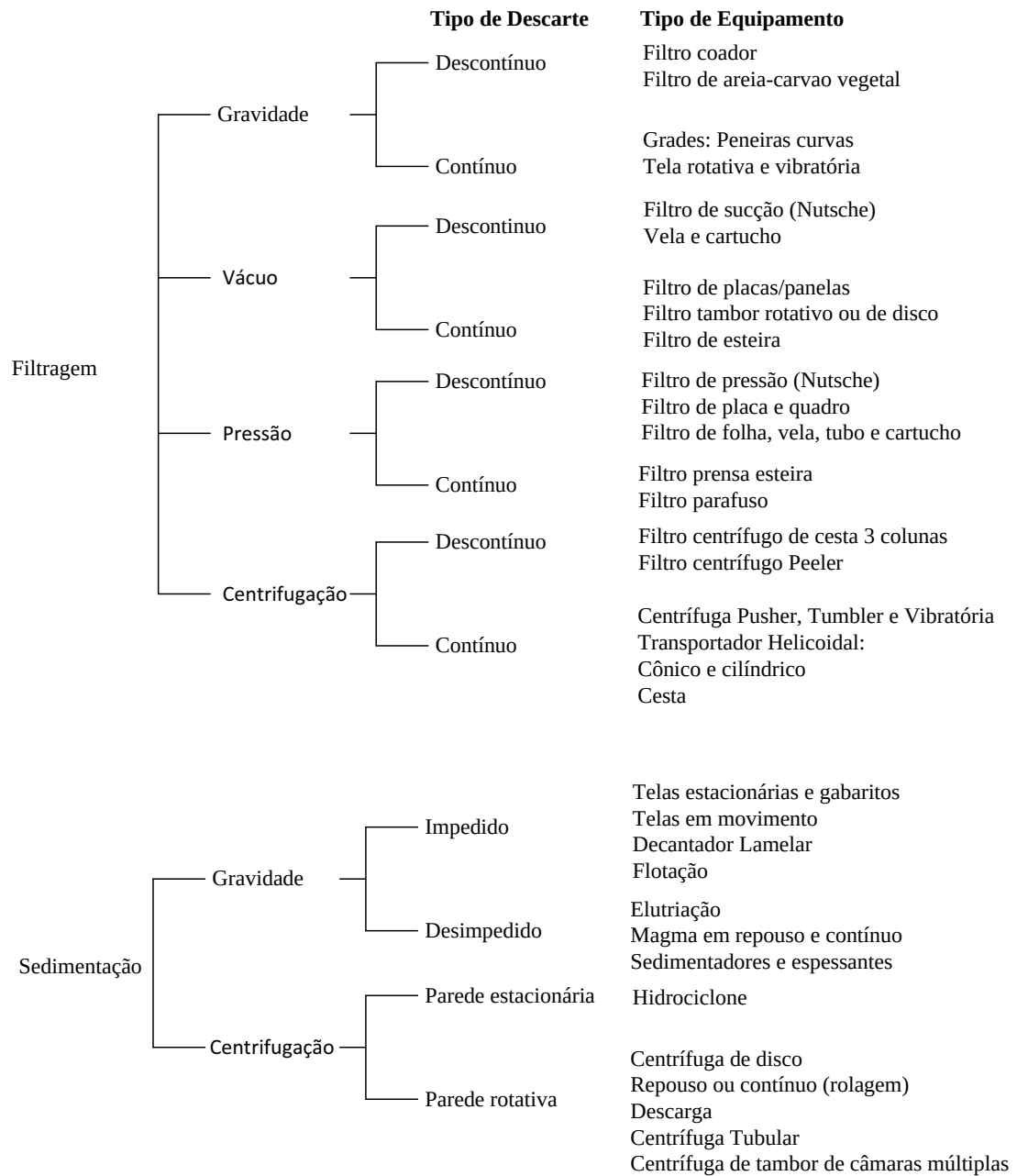
3.1 TECNOLOGIA DA SEPARAÇÃO

Os dois principais ramos da tecnologia de separação física, filtração e sedimentação, funcionam por mecanismos muito diferentes. A filtração atua inteiramente na partícula ou no tamanho de gotículas (e, em certa medida, na forma), de tal modo que partículas abaixo de um determinado tamanho passarão através de uma barreira, enquanto partículas maiores serão retidas para remoção posterior. O tamanho desta barreira é característica do elemento filtrante. A ampla gama de sistemas de filtragem é consequência em grande parte da necessidade de lidar com os sólidos acumulados no filtro, embora a também necessidade de conciliar a área de filtragem com a ocupação física da máquina num ambiente fabril seja outro fator decisivo de projeto. A operação de um filtro geralmente necessita de um diferencial de pressão no elemento filtrante, e este pode ser efetuado por meio de pressão de fluido a montante do filtro (filtro de pressão) por meio de bombas ou por sucção a jusante do filtro por bombas a vácuo (filtro a vácuo). (SUTHERLAND, 2008, p. 03, tradução nossa).

Sedimentação, por outro lado, opera na densidade das partículas ou gotículas, ou mais precisamente, na diferença da massa específica entre partículas suspensas e o fluido de suspensão. É a força da gravidade atuando na diferença de densidade (às vezes forças centrífugas mais fortes) que causa a separação por sedimentação, entre as fases distintas. O tamanho das partículas também desempenha papel na sedimentação, uma partícula de maior tamanho irá assentar mais rápido que outra menor de mesma densidade. A área de assentamento é a consideração primordial no processo de sedimentação, sendo esta diretamente proporcional à taxa de deposição, razão pela qual o custo extra de um filtro centrífugo muitas vezes compensa em virtude de menor necessidade de área de ocupação física na área fabril. (SUTHERLAND, 2008, p.03, tradução nossa).

A figura 2 mostra diferentes equipamentos que realizam a filtragem e a sedimentação, classificando ainda estes quanto ao tipo de descarte realizado.

Figura 2 - Classificação geral de equipamentos pelo tipo de descarte e processo de separação



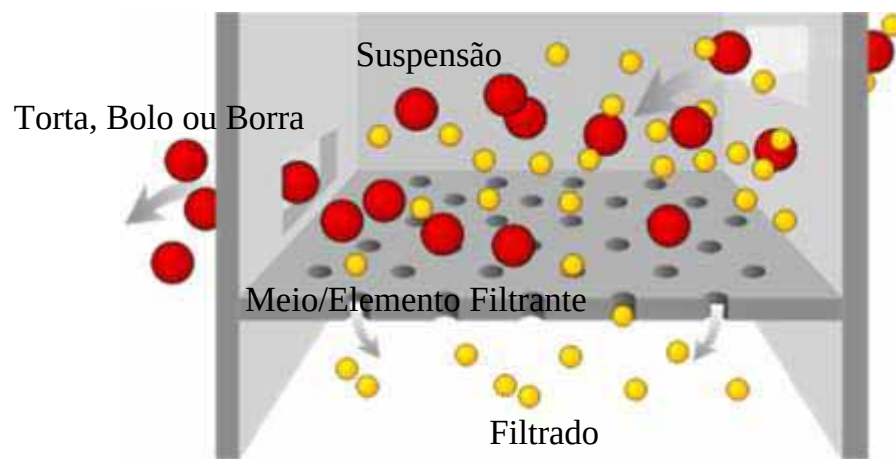
Fonte: Adaptado de (RUSHTON; WARD; HOLDICH, 1996)

Tecnologias de separação de sólido/ líquido têm dois propósitos principais: a remoção de sólidos indesejados em suspensão no fluido (que pode ser ele próprio um produto desejado ou um desperdício que precisa de limpeza antes da descarga) e a recuperação de um produto sólido em suspensão. Todos os quatro mecanismos citados na tabela podem ser usados para atingir tais propósitos. No entanto, em ambientes fabris, os mais utilizados são filtros (filtragem) e centrífugas (sedimentação). Da figura 2, a sedimentação possui ainda duas

técnicas de separação específicas: a eletrostática e a magnética. Em geral, técnicas de sedimentação são mais baratas que aquelas que envolvem filtração. A decantação por gravidade é a primeira a ser considerada quando existe um fluxo grande e contínuo de líquido.

Da figura 3, os termos contínuos e descontínuos nos processos de filtração se referem ao fato do filtro expulsar o material retido da filtração (bolo, borra, torta) após certo tempo de forma que não interrompa o processo.

Figura 3 - Esquema de filtração do tipo contínuo

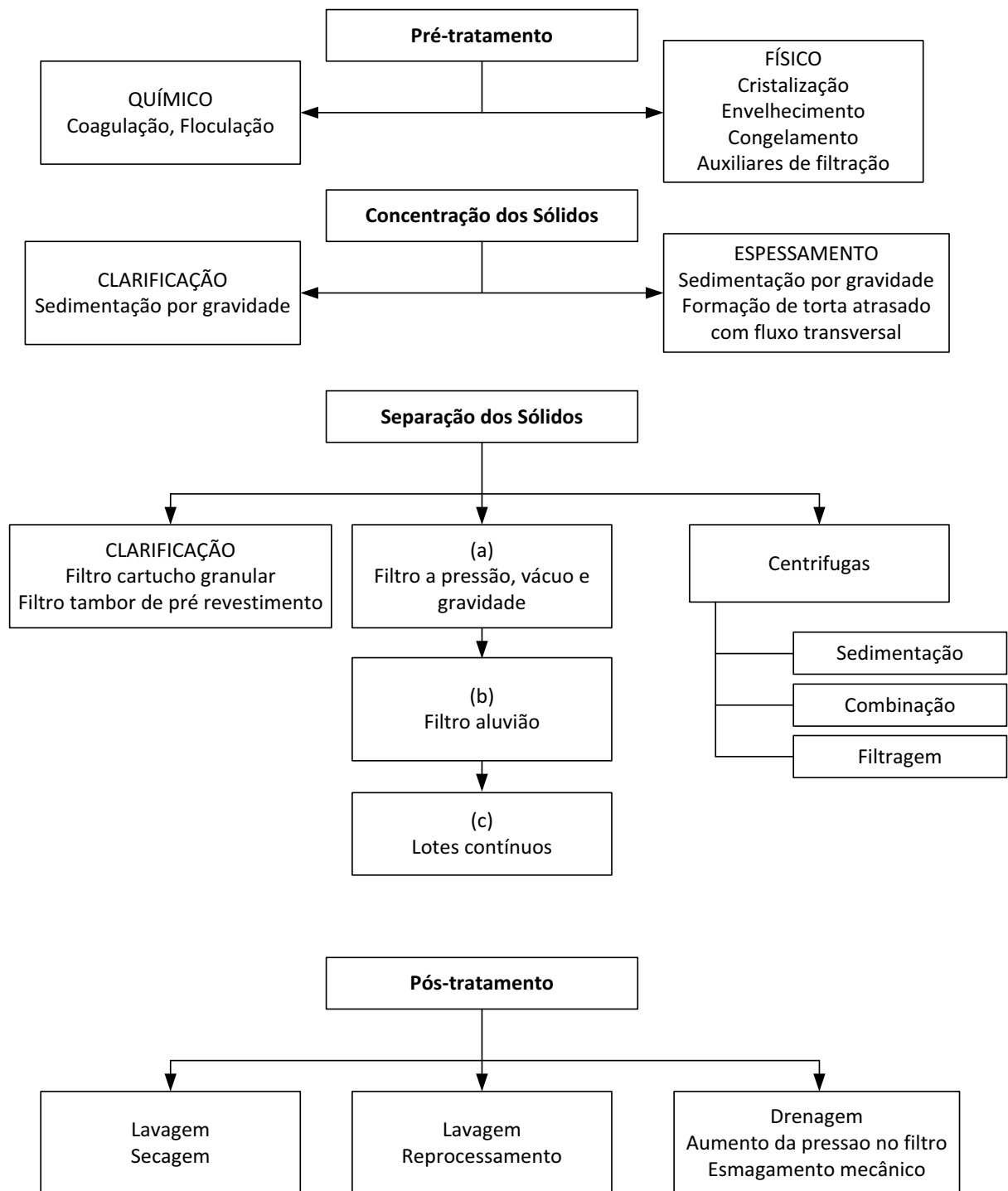


Fonte: Adaptado da (UNICAMP,2012)

O tamanho médio da partícula e a distribuição do tamanho destas, têm influência sobre o tipo de filtro escolhido para o tratamento de uma suspensão, escolha que deve ser feita de modo a produzir o mais eficiente sistema de filtração, de baixo custo de manutenção, baixo consumo de energia e que atenda os níveis de filtração exigidos. A faixa de filtração aparente de um determinado tipo de filtro pode ser enganosa tanto em termos de eficiência e custo-efetividade. Quanto mais fino o filtro, mais rapidamente ele se tornará obstruído por partículas mais grosseiras, de modo que, quando é necessária uma filtração muito fina, torna-se mais eficiente e mais rentável filtrar a suspensão por etapas, usando dois ou mais filtros em série, diminuindo progressivamente a micragem⁸. Assim, um sistema completo pode incluir um filtro inicial (pré-filtro), seguido por um filtro de média espessura (filtro intermediário) e por fim um ultrafiltro para a fase final (filtro final). A figura 4 esquematiza os estágios e métodos da separação sólido/líquido.

⁸ Denominação a unidade de medida Micra, é o plural de Micron ou Micrômetro, cada Micron equivale a dividir 1 milímetro por 1000 ou seja 0,001 milímetro. Bastante usado para especificar filtros.

Figura 4 - Estágios e métodos de separação sólido/líquido



Fonte: Adaptado de (RUSHTON; WARD; HOLDICH, 1996)

Assim, filtração ou, mais especificamente, nos dias de hoje “macrofiltração” é utilizado para a separação de partículas no intervalo de aproximadamente 1 mm até 5 μm (cinco micrômetros). De 4 μm até cerca de 0,2 μm o processo é designado microfiltração (MF) enquanto que abaixo desta micragem o termo ultrafiltração (UF) se aplica. UF abrange as mais “finas” partículas distintas (como colóides), mas o seu limite inferior é geralmente

definida em termos de peso molecular, medido em Daltons⁹. (SUTHERLAND, 2008, p. 04, tradução nossa).

Abaixo da ultrafiltração em termos de tamanho vêm a nanofiltração (NA) e a osmose reversa (OR), que são parecidos com processos de filtração e muitas vezes são descritos na situação em que uma membrana semipermeável¹⁰ é colocada como uma barreira em um fluxo de líquido. No entanto, NF e OR diferem da UF no princípio de funcionamento: o líquido tratado é agora uma solução sem (ou muito pouco, se devidamente pré-filtrado) matéria suspensa. As membranas não têm buracos físicos através deles, mas são capazes de dissolver uma ou mais espécies moleculares pequenas (tal como dessalinização da água por OR) devidos apenas ao próprio tipo de material que é constituída. (SUTHERLAND, 2008, p.04, tradução nossa).

Os quatro níveis de filtragem descritos na tabela 2 recebem denominação específica de filtragem por membrana.

Tabela 2 - Classificação de tipos de filtragem pelo tamanho dos poros

Classificação pelo tamanho dos poros				
	OR	NF	UF	MF
Tamanho do poro	< 0,002 μm	< 0,002 μm	0,2 – 0,02 μm	4 – 0,2 μm

Fonte: Adaptado de (WAGNER, 2001)

Um ponto final sobre a tecnologia de separação, embora não menos importante, é a necessidade do filtro e, especialmente o elemento filtrante, ser quimicamente compatível com a suspensão e seus componentes. Isto requer certa atenção, por exemplo, em casos em que o líquido é corrosivo (ácidos na indústria química) ou o sólido em suspensão é abrasivo, como na indústria automobilística na fabricação de motores e transmissão, onde o sólido em suspensão é metálico, com riscos de danificar máquinas e ferramentas preciosas.

⁹ Unidade de medida de massa utilizada para expressar a massa de partículas atômicas (massas atômicas de elementos ou compostos). Ela é definida como 1/12 da massa de um átomo de carbono-12 em seu estado fundamental. Seu símbolo é **u**, **uma** ou **Da**.

¹⁰ São membranas existentes na natureza que tem a capacidade de deixar passar somente líquido (a água), ou solvente, mas não deixar passar sais dissolvidos na solução.

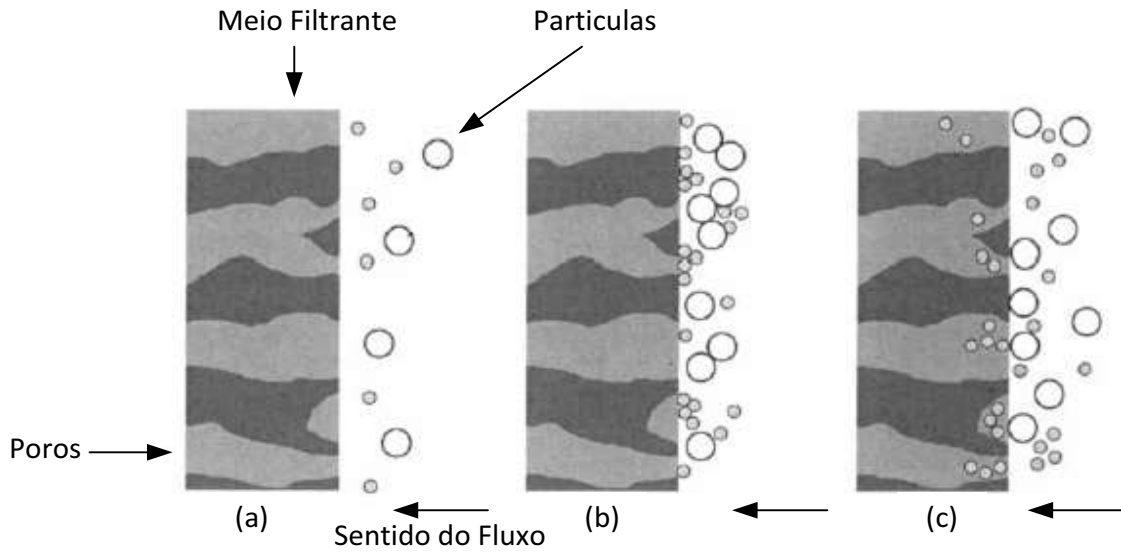
3.2 FUNDAMENTOS DA FILTRAÇÃO

Um entendimento dos mecanismos físicos envolvidos no processo de filtração é importante na resolução de alguns problemas que possam surgir em máquinas e equipamentos ou até evitando erros na seleção de sistemas de filtração. Anos de experiência em consultas práticas levariam a total compreensão do efeito das variáveis em termos quantitativos no processo de filtração. Tais variáveis são, vazão e viscosidade do fluido a ser filtrado, tamanho e concentração das partículas e tamanho dos poros ou canais do meio (elemento) filtrante. (RUSHTON; WARD; HOLDICH, 1996, p. 06, tradução nossa).

Um estágio de separação raramente é instalado isoladamente. Este normalmente é seguido de um processo de secagem ou desidratação dos depósitos porosos e/ou purificação dos sólidos recuperados por lavagem. Processos de pré e pós-tratamento como floculação, coagulação, entre outros, podem ter importância equivalente em determinar, às vezes, a duração do processo de separação. É vital identificar o tempo de processo das diferentes fases de separação a fim de identificar possíveis gargalos. Muitos exemplos poderiam ser citados de sistemas de filtração já instalados que não atendam às exigências do processo, e isto se aplica particularmente a sistemas que exigem rigorosas etapas de desidratação e lavagem. Uma prática da indústria para evitar tais erros e prejuízos muitas vezes incalculáveis é a realização do *Tryout*, que consiste em testar o sistema de filtração no fabricante e numa escala razoável para simular o seu funcionamento real e conferir se as exigências do processo são atendidas. No entanto, muitas vezes isso não é possível e a seleção dos sistemas deve ser tomada com base em dados de outros processos similares.

Um procedimento de seleção bem sucedida está intimamente ligado à escolha adequada do meio para ser utilizado na separação. Uma dificuldade dos processos em escala industrial se relaciona com a interação entre as partículas que colidem e os poros do meio filtrante, como representado na figura 5. A circunstância ideal, em que todas as partículas separadas são retidas sobre a superfície de um meio, muitas vezes não é realizada. A penetração de partículas no tecido ou na membrana dos poros conduz a um aumento na resistência do meio ao fluxo de filtrado. Este processo pode resultar na redução da capacidade de filtração e tais dificuldades podem ser evitadas se os poros do meio forem menores do que a menor de partículas do fluido. (RUSHTON; WARD; HOLDICH, 1996, p. 06, tradução nossa).

Figura 5 - Deposição de partículas na filtragem



Fonte: Adaptado de (RUSHTON; WARD; HOLDICH, 1996)

A deposição superficial, como mostrada na figura 5(c), é inversamente proporcional à duas resistências:

- a) Resistência do elemento filtrante: R_m
- b) Resistência da camada de partículas ou “torta”: R_t

A velocidade de filtragem v_o em um meio limpo é diretamente proporcional à diferença de pressão ΔP do fluido sobre o meio e inversamente proporcional à viscosidade do fluido μ e a resistência do meio como apresentado na equação 1.

$$v_o \sim \frac{\Delta P}{R_m \cdot \mu} \quad (1)$$

Sob o mesmo diferencial de pressão ΔP , a velocidade de filtragem após a formação de torta diminui para v_f . (RUSHTON; WARD; HOLDICH, 1996, p. 07, tradução nossa).

$$v_f \sim \frac{\Delta P}{(R_m + R_t) \cdot \mu} \quad (2)$$

Nas equações anteriores é assumido que a resistência do meio filtrante é constante durante o processo e tal condição será explicada posteriormente. Geralmente R_m assume baixos valores para meios ásperos como, por exemplo, telas de tecido. As maiores resistências são encontradas na filtragem por membranas, dos tipos microfiltração, ultrafiltração,

nanofiltração e osmose reversa. (RUSHTON; WARD; HOLDICH, 1996, p. 07, tradução nossa).

A resistência da torta varia numa ampla faixa, desde filtragem partículas de areia consideradas sem resistência (filtragem livre) até lamas de depuração de alta resistência. Geralmente, quanto menor a partícula maior será a resistência da torta. Esta é sensível a alterações no processo como concentração da borra, velocidade, temperatura e pressão do fluido. (RUSHTON; WARD; HOLDICH, 1996, p. 07, tradução nossa).

3.3 ELEMENTO FILTRANTE

Um elemento ou meio filtrante é qualquer material que, sob condições de operação do filtro, é permeável para um ou mais componentes de uma mistura, solução ou suspensão, e impermeável para os componentes restantes. (SUTHERLAND; PURCHAS, 2008, p.01, tradução nossa).

Qualquer material que seja poroso ou possa ser transformado numa estrutura porosa, mesmo com os poros do tamanho de um punho ou de um micrômetro, pode ser considerado como um elemento filtrante. (SUTHERLAND, 2008, p.41, tradução nossa).

No entanto, por questões lógicas, um filtro deve ser resistente à tensões, corrosão e abrasão, ser flexível e facilmente manipulado de forma a adquirir diversas formatos e intervalos de grau de porosidade. Estes requisitos reduzem razoavelmente o número de possíveis materiais candidatos a meio filtrante, mas ainda sim possibilita uma abundância de produtos como:

- Inorgânicos: minerais, carbono, vidro, metais, óxidos metálicos e cerâmicas;
- Orgânicos: naturais e sintéticos.

Desta forma os elementos filtrantes podem ser classificados pelo material ou pela forma que assumem conforme mostrado pela tabela 3.

Tabela 3 - Tipos de elemento filtrante de acordo com o material

Tipos de elemento filtrante de acordo com o material	
Material	Formato
Fibra natural: lã, algodão, etc.	Feltro: solto, ligado, agulha
Filamento natural: seda	Fio de tecido, filamento
	Fio de malha, filamento
	Fio enrolado
Fibra natural processada : celulose	TNT (papel, folha de filtro)
Orgânico manufaturado: celulose regenerada e polímeros sintéticos	Granulado: solto, ligado, sinterizado
	Malha extrudada (“Nelton”)
	Filamentos e fibras: feltro, tecido, dry-laid (torcido), wet-laid (papel), rígido, sinterizado
	Espuma
	Folha: perfurado, esticado, poroso, membrana
	Tubular: poros rígidos, fibra oca
Metais: ferrosos e não-ferrosos	Barra ou rolo
	Granulado ou pó: solto, sinterizado
	Fibras: solto, sinterizado
	Espuma
	Folha: perfurado (gravado)
	Fio: cartucho wound, malha de tecido, malha sinterizada
	Malha expandida (“Expamet”)
Vidro	Fibra: TNT (papel)
	Tubo poroso
Carvão: ativado naturalmente	Granulado ou pó: solto, ligado, embutido
	Fibra: solto, tecido, feltro, embutido
	Bloco poroso
Cerâmica: oxido metálico	Granulado ou pó: solto, sinterizado
outros	Blocos formados, com buracos tubulares
	Fibras: soltas, sinterizado
	Espuma
Outros minerais: lã mineral, areia, antracito, grãos de rochas (rubi)	Fibra: wet-laid (papel filtro)
	Grânulos
Materiais diversos: metal, papel, plástico	Sólidos: Discos empilhados, filtro de mantas, telas e fios enrolados
Grânulos inertes de todos os tipos	Tipo “Camas” (deep bed filters)
Mistura de materiais ativos e inertes	Combinação aleatória

Fonte: Adaptado de (SUTHERLAND, 2008)

3.4 MEIOS ADSORVENTES, ABSORVENTES E BIOLÓGICOS

O objetivo principal ao mostrar estes três elementos é apresentar em quais tipos de processos são usados. Eles operam por princípios físicos diferentes entre si e são usados com propósitos diferentes.

3.4.1 Meio absorvente

Um material absorvente é semelhante a uma esponja, que pode atrair fluido para dentro de si e reter esse líquido em sua estrutura, e o líquido só pode depois ser eliminado por uma alteração na fase (tal como a evaporação ou secagem). Nesse sentido, ele pode atuar como um filtro removendo as gotas de líquido. Assim, um papel não tratado, sendo um material absorvente, poderia filtrar gotículas de água numa corrente de ar. (SUTHERLAND, 2008, p.45, tradução nossa).

No entanto, a sua utilidade como um filtro industrial, neste caso, seria muito limitado, tanto no que diz respeito à retenção de umidade, como rapidamente atingiria a capacidade máxima de absorção e a resistência mecânica, que será reduzida pelo teor de umidade (o qual pode também atuar como um solvente para qualquer aglomerante no papel). O aumento na resistência em reter umidade pode ser alcançado contaminando o papel com neoprene, fenol-formaldeído e outras resinas sintéticas. (SUTHERLAND, 2008, p.45, tradução nossa).

Entretanto, a impregnação reduz a capacidade de absorção e é mais frequentemente o caso de papéis filtros serem tratados especialmente para se tornarem não absorventes, para proporcionar uma resistência mecânica máxima e resistência à ação de solventes.

Fibras naturais, como lã e algodão, e os feltros feitos a partir desses, são também materiais absorventes, mas a utilização de tais meios puramente como filtros absorventes é muito limitada. Estes materiais são largamente usados como meios de filtração, com as suas propriedades de absorção de importância secundária ou negligenciável. (SUTHERLAND, 2008, p.45, tradução nossa).

3.4.2 Meio adsorvente

Filtração por adsorção é a remoção de um fluido (gás ou líquido) de um componente líquido que é intimamente misturada às duas fases. O processo de adsorção ocorre na superfície de um material sólido, cuja área de superfície deve ser a maior possível e ocorre por atração de forças intermoleculares. Tipos específicos de material, normalmente no formato de

grânulos bastante refinados, podem exibir propriedades absorptivas quando em contato com contaminantes em vapor ou não sólidos presentes num líquido.

O principal elemento filtrante de adsorção são grãos ou pó de carbono que tenha sido ativado por vapor ou tratamento químico, a fim de se criar uma estrutura porosa, com área superficial elevada por unidade de peso do carbono. Uma argila de nome Terra Fuller¹¹, é naturalmente ativada e um meio adsorvente.

Meios adsorventes são largamente utilizados para a remoção de odores, fumos, gases, entre outros, em uma ampla gama de aplicações de filtros domésticos (por exemplo, cozinha fogão, exaustor), em sistemas de ar condicionado e de remoção de fumaça industrial. O carbono ativado é também um elemento filtrante comumente utilizado para a purificação da água em pequena escala, tais como abastecimento de água potável em trailers e barcos. Industrialmente, filtros adsorventes são utilizados para a remoção de odores dos óleos, odores e gostos de alimentos e bebidas. Meios adsorventes têm a propriedade de reter tanto contaminantes dissolvidos quanto não dissolvidos. (SUTHERLAND, 2008, p.45, tradução nossa).

Uma evolução no mercado de meios adsorventes foi o desenvolvimento em 1977 do tecido de carbono que assumisse diferentes formatos. Ele possui alta capacidade adsorptiva e tem a vantagem de ser forte e flexível resistente a choques e vibração, vindo a ser um excelente elemento filtrante de enorme tempo de vida. Ele é fabricado a partir de tecido de fibra de celulose pré-tratada, reduzido a 100% de carbono num forno com atmosfera controlada, de acordo a capacidade de adsorção e resistência desejada. O processo reduz o tecido de celulose para um quarto do seu peso original, dando origem a um tecido de carvão ativado com uma elevada porosidade e de elevada área superficial. Apesar de ser um processo de alto custo, o “pano” de carvão vegetal tem aplicações especiais, como respiradores hospitalares e máscaras de gás. (SUTHERLAND, 2008, p.46, tradução nossa).

3.4.3 Meio biológico

Existe outro grupo de elemento no qual o ato de filtração não é o papel principal, mas apenas faz parte do processo. Estes são os filtros biológicos muito utilizados no tratamento de água e águas residuais. Eles consistem de leitos de pedras britadas que servem de suporte de fixação de micro-organismos aeróbios responsáveis pela conversão e oxidação de matéria

¹¹ Argila do tipo montmorilonítica que tem várias utilidades desde fins farmacêuticos até na perfuração do poço do petróleo e vem sendo utilizada na clarificação do sebo.

orgânica e nutrientes. Os filtros biológicos são operados em série, para maximizar a nitrificação. (SUTHERLAND, 2008, p.46, tradução nossa).

3.5 MÍDIAS DE PAPEL

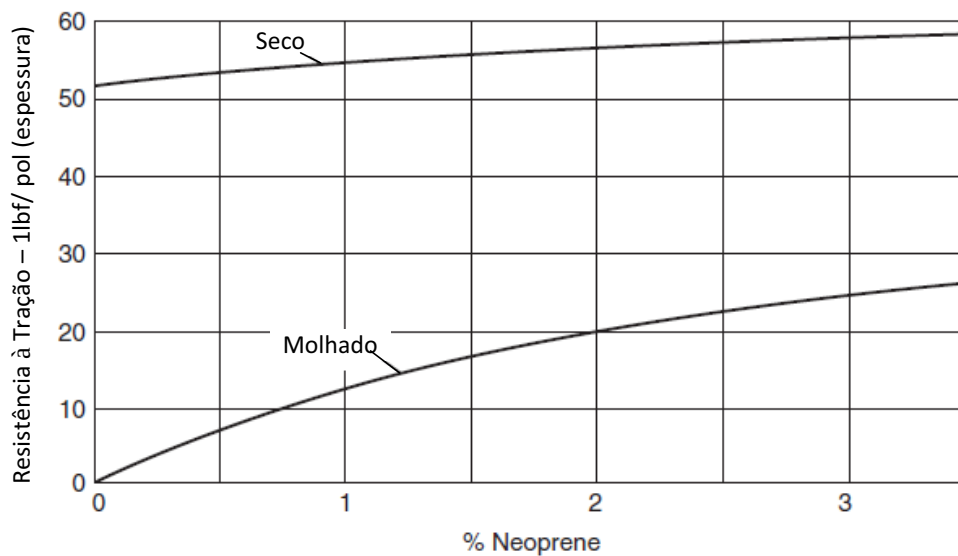
O papel é formado por massa úmida de fibras de celulose sobre uma faixa de fios de tecido, que é efetivamente o filtro através do qual a água é drenada e as fibras são assentadas de forma a produzir uma folha contínua. Uma suspensão de fibras de celulose é formada por desintegração ou tratamento químico e então lentamente e de forma uniforme são alimentados sob a suspensão de fios de tecido. As fibras se assentam de uma maneira aleatória para formar a folha de papel, que tem de ser pressionado e seco para se conseguir o teor de humidade requerido. (SUTHERLAND, 2008, p.47, tradução nossa).

As principais desvantagens da mídia de papel são a sua alta resistência específica e sua limitada resistência mecânica. Para compensar o último, elementos filtrantes de papel são mais comumente usados em forma plissada, aumentando consideravelmente a área superficial para um determinado tamanho de elemento. Isto reduz substancialmente a velocidade de fluxo através do papel e, portanto, a resistência efetiva global ao fluxo. A plissagem¹² também melhora a rigidez do elemento, embora seja normalmente suportado por um tubo perfurado internamente ou um núcleo. A profundidade da plissagem é geralmente da ordem de um quarto do diâmetro do elemento. (SUTHERLAND, 2008, p.48, tradução nossa).

Uma forma de melhorar a resistência do papel filtro é a adição de ligantes como o neoprene. A adição de uma pequena quantidade de neoprene aumenta significamente a resistência “úmida” do papel filtro como mostrado na figura 6. (SUTHERLAND, 2008, p.47, tradução nossa).

¹² Técnica de dar dobras ou pregas ao tecido, fazer plissê.

Figura 6 - Efeito do ligante Neoprene na resistência do papel filtro.



Fonte: Adaptado de (SUTHERLAND, 2008)

No entanto, os papéis tratados têm duas grandes vantagens como meio filtrante: eles podem ser fabricados com valores nominais “cut-off”¹³ de 10-20 μm ou melhor, capazes de remover uma alta proporção de partículas muito finas; e ainda são materiais baratos. (SUTHERLAND, 2008, p.48, tradução nossa).

Devido a limitação de resistência mecânica dos meios de papel eles suportam no máximo uma pressão de 7 bars. Isso pode ser melhorado por reforços rígidos, como por exemplo, um suporte de rede de arames, porém em pressões elevadas aumenta a possibilidade de migração do meio (fibras de papel se rompem e contaminam o filtrado). Esta é sempre uma possibilidade com meios de papel em sistemas de filtragem que não possuem válvulas de alívio de pressão antes do elemento filtrante. (SUTHERLAND, 2008, p.48, tradução nossa).

Outra limitação inerente aos elementos de papel é que a própria natureza do material não fornece um valor “cut-off” absoluto. Certamente haverá poros maiores do que o valor nominal e partículas maiores podem passar pelo filtro. Isso impossibilita o uso dos papéis na microfiltragem. Por outro lado, o desempenho dos papéis e, especialmente quando impregnados por resina, pode ser superior ao desempenho de outros meios de filtração por tecido. (SUTHERLAND, 2008, p.49, tradução nossa).

¹³ Refere-se ao diâmetro, normalmente expresso em micrometros (μm), da maior partícula que vai passar através do filtro.

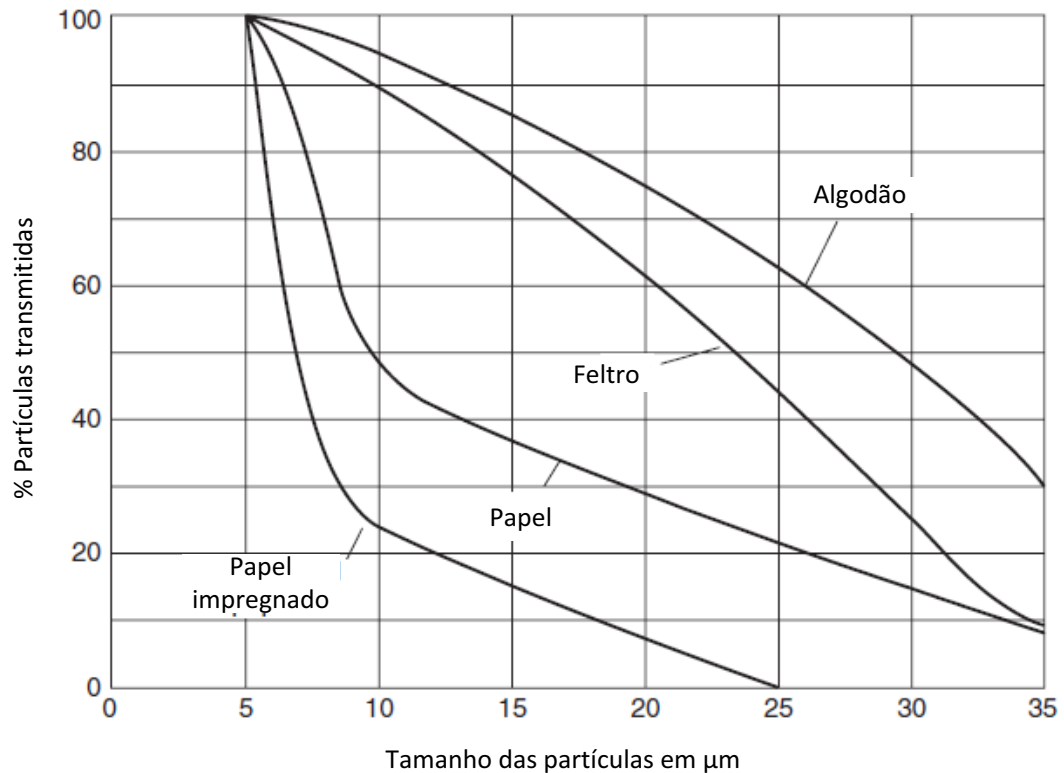
O fato de alguns contaminantes sólidos tenderem a penetrar nas profundezas do papel, e assim tornarem-se alojados, pode fazer com que a limpeza seja difícil ou até mesmo impraticável. No caso de fluidos secos, tais como o ar, a limpeza adequada pode ser fornecida por um fluxo de retorno de ar para soprar o bolo para fora da superfície. Meios de papel podem então ser reutilizáveis, em tais casos. Com fluidos molhados, tais como óleo ou água, é mais usual empregar elementos de filtro descartáveis, que são simplesmente substituídos quando ficam obstruídos.

3.6 MÍDIAS DE TECIDO

Mídias de tecido são os mais usados dentro todos os tipos de elemento filtrante. Eles são feitos a partir de fibras ou filamentos de materiais naturais ou sintéticos e são caracterizados por serem relativamente mole ou flexível, sem a rigidez do papel seco. De tal forma que eles normalmente necessitam de algum tipo de apoio antes que possam ser utilizados como um elemento filtrante. (SUTHERLAND, 2008, p.50, tradução nossa).

Tecidos podem ser considerados como uma alternativa imediata e fisicamente mais resistente à mídia de papel e outros elementos plissados. Mídia de tecido originalmente foi o tipo mais usado para filtração fina e são geralmente comparáveis com modernas mídias de papel no que diz respeito ao desempenho alcançável. Até o aparecimento de elementos de papel tratados, eles eram vistos como um tipo superior, embora os dois agora sejam estritamente competitivos para funções semelhantes. Algumas curvas típicas de desempenho entre diferentes materiais são mostradas na figura 7. Tecido é a mídia mais comum devido ao baixo custo, entretanto suportar pressões de trabalho superiores às outras mídias em condições similares. Os tecidos, no entanto possuem uma resistência específica menor do que o papel e por ser mais espessa também pode transportar uma carga maior de contaminante por unidade de área. (SUTHERLAND, 2008, p.51, tradução nossa).

Figura 7 - Comparação de desempenho de filtragem por porcentagem de partícula transmitida ao filtrado



Fonte: Adaptado de (SUTHERLAND, 2008)

Para elementos de mesmo formato, mídia de tecido, provavelmente, será o preterido em situações que requerem filtros de maior tamanho ou onde alto grau de absorção é requerido, bem como blindagem mecânica. O termo “tecido” é bastante amplo, em comparação com “papel”, o qual é bastante específico. Tecidos podem compreender uma vasta gama de materiais como visto na tabela 4, cujas propriedades podem ser ainda modificados por impregnação com resina sintética ou tratamento semelhante. Muitas vezes o termo “pano” é usado para descrever a mídia de tecido, naturais ou sintéticos.

Tabela 4 - Comparação de propriedades de diferentes tipos de média de tecido

Comparação de propriedades de diferentes tipos de média de tecido.										
	Lã	Algodão	Poliéster	Acrílico	Nylon	Aramida	Polipropileno	PVC	PTFE	Fibra de vidro
Tipo de fio	S	S	S,F,MF	S,F	S,F,MF	S,F	S,F,MF	S,F,MF	S,F,MF	S,F
Peso específico	1,30	1,52	1,38	1,15-1,17	1,04-1,14	1,38	0,91	1,35	2,1	2,1
Resistência a tração relativa (Lã=1)	1	2-4	3,75-6,25	1,85-3,75	3,75-6,5	5-20	3,75-6	2,2	1,3	8-15
Alongamento na ruptura	30-40	5-7	11-14	17-42	18-20	18-20	35	35-40	15	2-4
Temperatura máxima de trabalho contínuo °C	80-90	90-100	130-135	130-135	100-110	200-220	80-90	80-90	240-260	280-300
Temperatura máxima de trabalho °C	100	110	140	140	120	260	90-100	90-100	280	320
Resistência química										
Ácidos fortes	F	X	G	G	X	F	E	E	E	G
Ácidos fracos	G	F	E	E	F	G	E	E	E	G
Alcalinos fortes	X	G	X	G	G	G	G	E	E	E
Alcalinos fracos	F	E	F	G	E	G	E	E	E	G
Solventes	G	G	G	G	E	G	X	F	E	E
Agentes oxidantes	X	F	E	G	F	G	X	E	E	E
Resistência ao calor húmido	F	G	X	E	F	F	F	G	E	G
Legenda:										
*S=Elemento básico	M= Monofilamento	E=Excelente	F=Razoável							
	MF=Multifilamento	G=Bom	X=Dissolvido							

Fonte: Adaptado de (SUTHERLAND, 2008)

3.7 TECIDO MONOFILAMENTO SINTÉTICO

São tecidos produzidos a partir da extrusão de filamentos sintéticos com diâmetro de 30 μm a 2-3 mm. Este tipo de tecido se tornou um importante elemento filtrante para uma ampla gama de indústria e aplicações. Devido sua resistência à corrosão, fadiga vibracional, uniformidade e baixo custo, meios filtrantes de monofilamento têm substituído vários outros tipos de meios. Os maiores mercados para o uso de monofilamentos são a indústria química, alimentícia, hidráulica, medicinal e automotiva. Este tipo de tecido está disponível em diferentes tipos de polímeros como o nylon, poliéster, polipropileno e materiais a base de flúor-carbono, numa escala de abertura “cut-off” de 5-5000 μm . (SUTHERLAND, 2008, p.56, tradução nossa).

Tecidos sintéticos de monofilamento, devido sua ductilidade e memória estrutural, podem ser flexionados repetidamente sem endurecer e fadigar. Eles podem ser dobrados ou amassados com menos risco de danos do que um tecido metálico e ainda são mais leves. Algumas aplicações ainda requerem elementos filtrantes com propriedades físicas de monofilamentos sintéticos, mas com superfície metálica para dissipação de energia eletrostática. Assim, existe tecidos monofilamento de poliéster metalizado revestidos com uma camada de níquel de 2 μm de espessura. (SUTHERLAND, 2008, p.56, tradução nossa).

3.8 MÍDIAS DE TECIDO NÃO TECIDO

Desde os primeiros filtros inventados, o tecido era usado como mídia na maior parte deles. No início da década de 40, por meio de processos químicos, mecânicos, térmicos ou com solventes, fibras desorientadas puderam ser aglomeradas e ligadas entre si, dando origem ao tecido não tecido.

Essa técnica elimina a necessidade dos processos têxteis comuns como a fiação e tecelagem. Há basicamente dois tipos distintos, os duráveis e os não duráveis, podendo ambos ser produzidos a partir de fibras naturais (algodão, lã), ou sintéticas (poliéster, polipropileno).

No caso da lã, o TNT¹⁴ produzido é popularmente chamado de feltro¹⁵. Modernos feltros são produzidos a partir de fibras sintéticas ou mistura de fibras naturais com sintéticas, ligadas por um adesivo ou mecanicamente com controle preciso durante a fabricação para atingir uma densidade consistente, tamanho e geometria dos poros de forma que se tenha um valor preciso e confiável de “cut-off”. A estrutura dos feltros é considerada mais aberta do que a dos papéis, assim durante filtração de profundidade, oferece menor resistência proporcionando um maior fluxo de fluido com baixa queda de pressão por menor elemento de área.

Este material é usado como mídia filtrante em casos de demanda continua por uma filtração mais fina. O TNT pode ser montado de maneiras bastante complexas a fim de atender especificações restritas. Fatos esses que demonstram o porquê deste tipo de mídia domina o mercado atual.

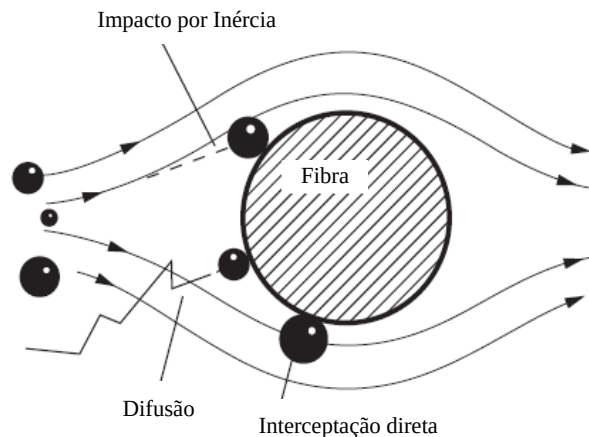
3.9 FILTRAGEM SUPERFÍCIE X PROFUNDIDADE

A maior parte dos meios filtrantes existentes é à base de fibras e para o entendimento de como a filtração ocorre é necessário examinar a forma como as fibras retêm as partículas. O processo é ilustrado na figura 8 e mostra uma fibra em corte num fluido direcionado à direita contendo algumas partículas.

¹⁴ É a sigla para tecido não tecido, é um tecido classificado como um não tecido. É produzido a partir de fibras desorientadas que são aglomeradas e fixadas, não passando pelos processos têxteis mais comuns que são fiação e tecelagem (ou malharia).

¹⁵ Feltro é um papel feito de lã ou pelos de animais, cujas fibras são agregadas por calandragem.

Figura 8 - Mecanismos de retenção de partículas



Fonte: Adaptado de (SUTHERLAND, 2008)

O primeiro ponto a considerar é que qualquer partícula, na ausência de cargas elétricas na fibra ou na partícula, uma vez que é aproximada à fibra, será atraída e o contato feito de forma que a partícula fique estagnada. As forças de atração, Forças de Van der Waal, apesar de serem bastante fracas são suficientes para segurar a partícula sobre a superfície da fibra uma vez que o contato já tenha ocorrido. A partícula, que deve estar muito próxima para esse processo ocorrer, se torna uma extensão da fibra e uma armadilha para reter demais partículas. (SUTHERLAND, 2008, p.16, tradução nossa).

Outro ponto é o fato de que o fluxo no interior do meio é praticamente, se não quando forçado, laminar de modo que as linhas de corrente contornam suavemente os obstáculos em seu caminho como mostrado na figura 8. Se a partícula é bem menor que a fibra, ela estará inserida nas linhas de corrente e atravessará o meio fibroso sem que seja apanhado. (SUTHERLAND, 2008, p.17, tradução nossa).

A distância máxima permitida a uma partícula passar da fibra e ser retida equivale à metade do seu diâmetro. Este mecanismo é conhecido como interceptação direta, e por definição, deve ocorrer nos flancos da fibra e não diretamente na parte frontal.

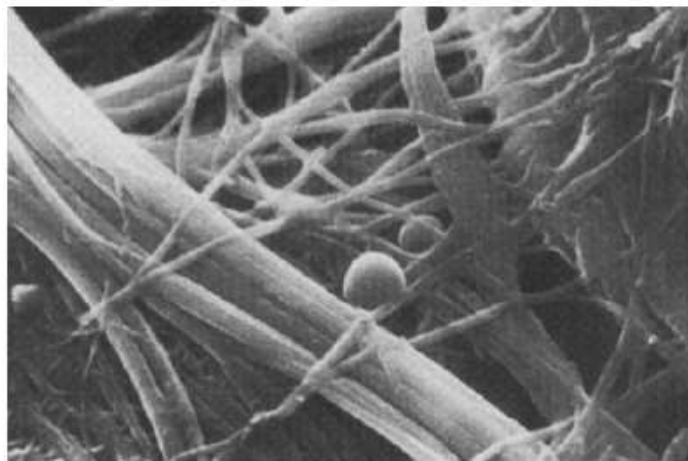
Outro mecanismo de coleta é chamado de Impacto por Inércia e ocorre quando partículas maiores (ou em movimento rápido) não conseguem fazer a curva realizada pela linha de corrente e pela inércia colidem contra a fibra e ficam retidas.

Outro comportamento observado é quando partículas bem pequenas não seguem as linhas de corrente e realizam um movimento desordenado, denominado Browniano, levando ao contato contra a fibra na maioria das vezes na parte frontal. Tal mecanismo de colisão é denominado de Difusão, como é o caso da menor partícula mostrada na figura 8. Estes são os

três principais mecanismos de retenção de partículas em um leito de fibras, entretanto ainda há outros menos importantes.

Até agora todos os mecanismos mostrados envolvem algum tipo de contato superficial com as fibras e, por conseguinte a retenção destas, passando através da fibra o fluido filtrado. No entanto partículas de formatos uniformes serão retidas, como mostrado na figura 9, ao longo da passagem através de uma malha de fibras e não diretamente na superfície. Outra situação que ocorre o mesmo mecanismo trata-se quando as partículas são muito pequenas, menores até que os poros da malha de fibra, e estas são retidas durante o percurso até atravessar a malha de fibra, como visto na figura 9, que mostra um foto de um mícron de massa de fibra ampliada 9500 vezes.

Figura 9 - Finas partículas retidas entre fibras



Fonte: Adaptado de (SUTHERLAND, 2008)

Esta capacidade em reter partículas mesmo menores que a abertura aparente da malha é muito importante e reflete na importância da escolha do tipo correto de elemento filtrante dependendo das características do processo e fluido a ser filtrado.

3.9.1 Superfície x Profundidade

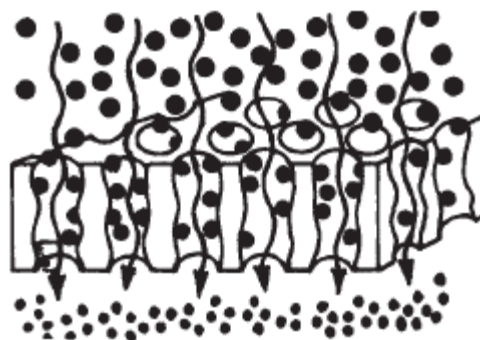
Se durante a filtração a barreira imposta ao escoamento for mais fina que o diâmetro da menor partícula (ou tamanho dos poros) em suspensão a ser filtrada, então toda a filtração ocorrerá na superfície do meio filtrante. Qualquer partícula menor que o diâmetro do poro atravessará o meio e seguirá com o fluxo (filtrado) e partículas maiores permanecerão na superfície. Outras partículas, no entanto devido ao tamanho se encaixariam perfeitamente

dentro do poro e bloqueando a passagem do fluido. Assim, a superfície do meio gradativamente acumular-se-ia de partículas da mesma forma que o fluxo reduziria até um nível aceitável. Neste ponto a filtração seria interrompida e a superfície do meio escovada ou raspada (de forma manual ou automática).

Este processo é denominado de Filtragem de Superfície, pois funciona inteiramente na relação de tamanho das partículas suspensas e o tamanho dos poros da tela ou mídia filtrante. A não ser que as partículas sejam deformáveis, o filtrado terá apenas partículas de dimensão no máximo igual ao tamanho dos poros existentes. Este mecanismo é observado com uso de telas, placas perfuradas, camada única de fio de tecido ou plástico em malhas. (SUTHERLAND, 2008, p.18, tradução nossa).

No entanto, é claro que a maior parte das mídias filtrantes usadas na realidade não é tão fina e seus poros variam de diâmetro no sentido do fluxo de filtração. Um segundo mecanismo, designado por Filtragem de Profundidade, se aplica quando a partícula não é retida nos poros superfícies e sim por outro demasiadamente menor no decorrer do trajeto no interior do meio filtrante. Assim esse poro no interior do meio é bloqueado, dependendo do nível de partículas o filtro entope, sendo necessária sua limpeza por um fluxo do próprio fluido no sentido reverso ou até mesmo seu descarte. (SUTHERLAND, 2008, p.18, tradução nossa).

Figura 10 - Filtragem de Profundidade.



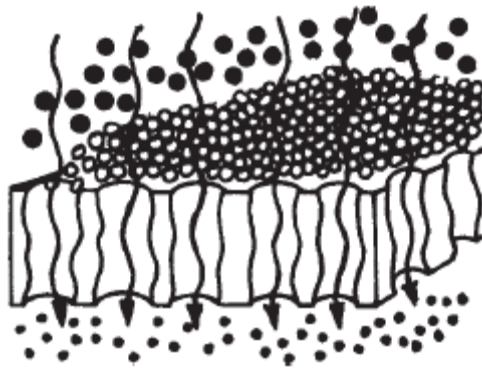
Fonte: Adaptado de (SUTHERLAND, 2008)

Como mostrado na figura 10 alguns poros (não todos) se tornam bloqueados durante a passagem do fluxo pelo meio, no entanto o fluido ainda passa entre as partículas presas.

Quando a concentração de sólidos é muito alta, como em alguns processos que exigem varias etapas de separação, ocorre um mecanismo diferente. Devido à alta concentração de sólidos, as partículas disputam entre si, na entrada dos poros, e após um curto período quando as menores partículas atravessam os poros, elas mesmas criam uma ponte para demais

partículas passarem ou serem retidas. Assim as próprias partículas retidas atuam como um meio filtrante e ocorre até um nível onde a diferença de pressão é crítica ao processo. À este mecanismo, o denominamos de Filtração por Torta (Bolo, Borra), e nele coexiste os outros dois mecanismos de filtração por superfície e profundidade (na torta) como mostrada na figura 11.

Figura 11 - Filtração por Torta, Bolo ou Borra



Fonte: Adaptado de (SUTHERLAND, 2008)

A filtração por torta apresenta algumas complicações devido ao fato do bolo ser compressível devido às forças de diferencial de pressão tornando-os de difícil remoção. Este mecanismo ocorre muito nos filtros industriais, e nesses casos a torta é simplesmente soprada a partir da superfície livre da mídia por meio de um escoamento (gás, líquido) no sentido reverso da filtração.

3.10 ESCALA DE FILTRAGEM

Os filtros recebem níveis, numa escala, de filtração de acordo com a habilidade em reter partículas de determinado tamanho de uma suspensão. Há diferentes métodos no qual um desempenho de filtração pode ser especificado e obter informações quantitativas, no entanto deve-se sempre mostrar o método de ensaio utilizado.

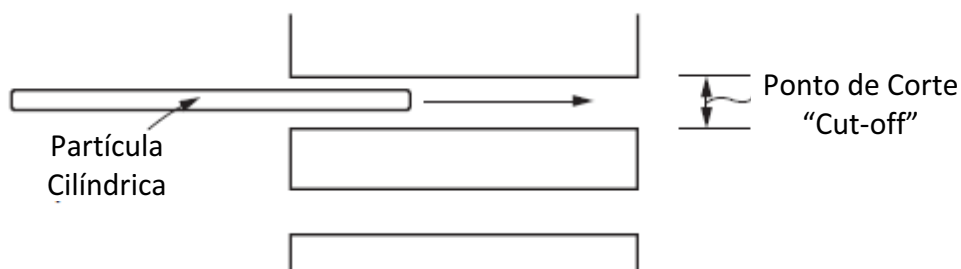
O objetivo de um filtro é remover (por completo ou parcial) partículas sólidas, a um determinado tamanho, de um fluido em suspensão. Diferente de soluções testes, suspensões reais possuem partículas de diferentes tamanhos e a eficiência real de filtração será afetada pela quantidade de sólidos que cruzar o filtro (não retido) e a energia requerida para capturar o resto (é a espessura do meio que dita o consumo de energia pelo filtro).

3.10.1 Escala absoluta

O ponto de corte “cut-off” de um filtro ou popularmente micragem, refere-se ao diâmetro, normalmente expresso em micrometros (μm), da maior partícula que vai passar através do filtro, embora isso não represente necessariamente a menor partícula retida no filtro, pois partículas menores podem ser retidas (em menores proporções) pelos mecanismos de adsorção descritos anteriormente. Se um meio filtrante possui um tamanho de poro ou abertura exato e consistente, então este “cut-off” pode ser definido como escala absoluta. No entanto, na realidade os elementos filtrantes não possuem um tamanho de poro uniforme e exato, e as partículas solidas em alguns casos não possuem formato esférico, sendo este formato de partícula usado nos testes de classificação dos filtros devido á facilidade em mensurá-lo.

O formato do particulado pode interferir diretamente na efetividade de um filtro. Por exemplo, uma partícula cilíndrica (tipo agulha) ou achatada (tipo lâmina) pode atravessar um filtro de micragem consideravelmente menor que o diâmetro nominal das partículas, como mostrado na figura 12. Esta imagem poderia significar um fluido com partículas em suspensão em forma de placas passando por um filtro de manta metálica. Isso mostra os cuidados que devem ser tomados na escolha de um filtro de modo a garantir uma proteção adequada ao sistema de filtragem seja adotado. (SUTHERLAND, 2008, p.21, tradução nossa).

Figura 12 - Passagem de partículas anormal



Fonte: Adaptado de (SUTHERLAND, 2008)

Alguns tipos de meios filtrantes, tais como papel, feltro e pano de tecido, tem um tamanho de poro variável, e por isso não tem uma escala absoluta de filtragem. A eficácia do “cut-off” é determinada em grande parte pela disposição aleatória dos poros e a espessura do meio. O desempenho pode ser descrito em termos de um “cut-off” ou escala nominal.

3.10.2 Escala nominal

Um valor de escala nominal é qualquer valor arbitrário dado a performance do filtro, determinado pelo fabricante do mesmo, e é expresso em termos de porcentagem de retenção de um específico contaminante (geralmente partículas esféricas de vidro) de determinado tamanho. Também apresenta uma imagem da eficiência nominal do filtro. Este valor de escala é assumido normalmente na faixa de 90, 95 ou 98% de retenção para um determinado tamanho de partícula. Muitos fabricantes usam tais testes, mas a falta de uniformidade e reprodutibilidade nestes tem causado uma queda de valor desfavorável. (SUTHERLAND, 2008, p.22, tradução nossa).

A variação pode ser até grande. Por exemplo, um elemento filtrante do tipo feltro com classificação nominal de filtração dada em 30 µm pode mesmo assim deixar passar de 20 a 40% de partículas deste exato tamanho. Ao mesmo tempo, pode reter em grande quantidade partículas menores que estas. Esta retenção de partículas menores que o valor nominal do filtro acontecerá sempre, numa proporção que dependerá do tipo de design do elemento filtrante.

3.10.3 Escala ISO 4406

A ISO 4406 (International Standards Organization), que determina o nível padrão de contaminação em óleos hidráulicos, tem sido bastante utilizada por fabricantes de filtros e máquinas para suas especificações de produto, pois consiste num código de 3 dígitos que simplifica os relatórios de contagem de partículas. Tal código, vide figura 13, refere-se ao número de partículas maiores que 2, 5 e 15 micra, se medidas por microscópio, ou maiores que 4, 6 e 14 micra se medidas por contador de partículas eletronicamente, em um certo volume, geralmente 1 mililitro ou 100 mililitros. Comercialmente é utilizado com base as medidas de uso de microscópio. O número de partículas 2+ e 5+ micra é usado como ponto de referência para partículas sedimentadas. O tamanho 15+ indica a quantidade de partículas maiores presentes que contribuem para uma possível falha catastrófica do componente.

Figura 13 - Escala ISO 4406 de nível de contaminantes

Código ISO 4406	Quantidade de partículas/ 100ml		Método de contagem por ...		
	De	Até	... contador eletrônico de partículas		
5	16	32	21	/	18
6	32	64	>4 μm_c	>6 μm_c	15
7	64	130			14 μm_c
8	130	250	... microscópio		
9	250	500	21	/	18
10	500	1000	>2 μm_c	>5 μm_c	15
11	1000	2000			
12	2000	4000			
13	4000	8000			
14	8000	16000			
15	16000	32000			
16	32000	64000			
17	64000	130000			
18	130000	260000			
19	260000	500000			
20	500000	1000000			
21	1000000	2000000			
22	2000000	4000000			
23	4000000	8000000			
24	8000000	16000000			
25	16000000	32000000			
26	32000000	64000000			
27	64000000	130000000			
28	130000000	250000000			

Fonte: Adaptado de (HYDAC INTERNATIONAL, SDP¹⁶)

¹⁶ Sem data de publicação

3.10.4 Escala NAS 1638

A NAS 1638 é um padrão de limpeza desenvolvido nos Estados Unidos da América para avaliar componentes da indústria aeroespacial que foi difundida para outros ramos e ainda é muito utilizada em indústrias que trabalham com fluidos em alta quantidade e requerem uma análise da quantidade de contaminantes em seus fluidos. A figura 14 mostra diferentes quantidades de partículas a diferentes tamanhos separados por classes. Assim um fluido é normalmente classificado com a classe NAS que mais se aproxima (pior caso possível) da faixa de tamanho de particulados.

Figura 14 - Classes NAS 1638 de nível de contaminantes

Intervalo		5-15 μm	15-25 μm	25-50 μm	50-100 μm	>100 μm
Classe NAS 1638 de limpeza (1/100ml)	00	125	22	4	1	0
	0	250	44	8	2	0
	1	500	89	16	3	1
	2	1 000	178	32	6	1
	3	2 000	356	63	11	2
	4	4 000	712	126	22	4
	5	8 000	1 425	253	45	8
	6	16 000	2 850	506	90	16
	7	32 000	5 700	1 012	180	32
	8	64 000	11 400	2 025	360	64
	9	128 000	22 800	4 050	720	128
	10	256 000	45 600	8 100	1 440	256
	11	512 000	91 000	16 200	2 880	512
	12	102 4000	182 400	32 400	5 760	1 024

Fonte: Adaptado de (PARKER, SDP)

3.10.5 ISO 4406 x NAS 1638

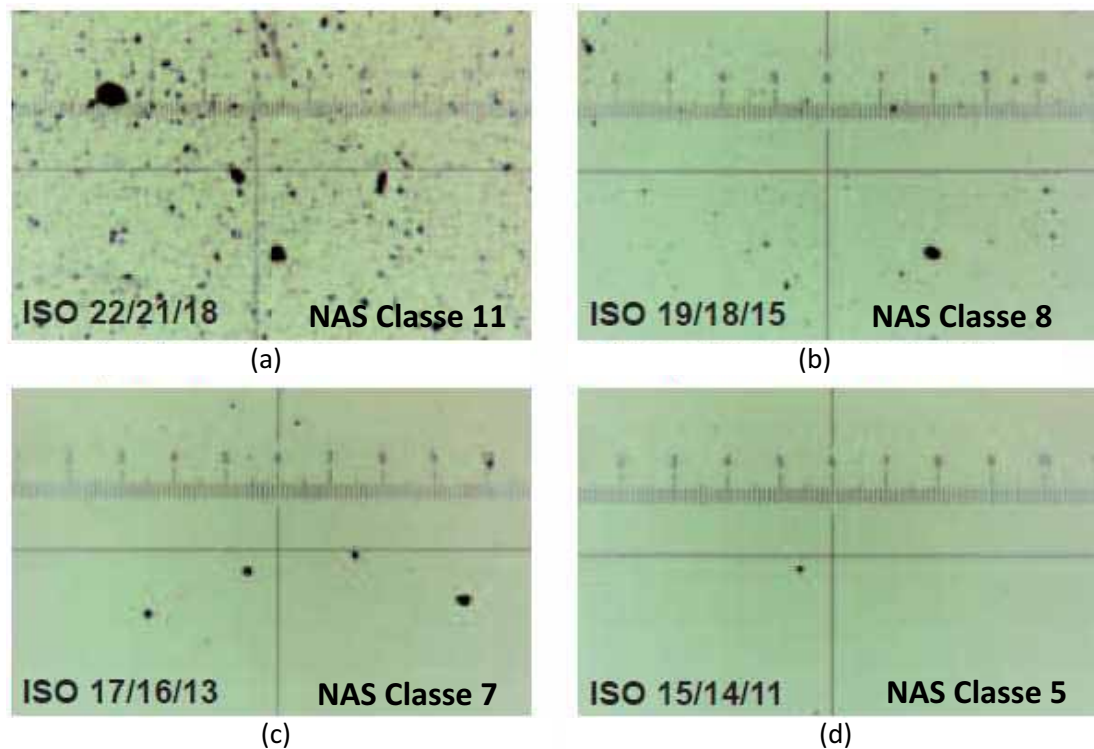
Estas duas escalas são a mais usadas nos dias atuais, muitas vezes as duas coexistem em análises de laboratórios. Assim as figuras 15 e 16 mostram um comparativo entre as duas classes de contaminação.

Figura 15 - Comparação entre norma ISO 4406 e NAS 1638

ISO/DIS 4406	NAS 1638
13 / 11 / 08	2
14 / 12 / 09	3
15 / 13 / 10	4
16 / 14 / 09	
16 / 14 / 11	5
17 / 15 / 09	
17 / 15 / 10	
17 / 15 / 12	6
18 / 16 / 10	
18 / 16 / 11	
18 / 16 / 13	7
19 / 17 / 11	
19 / 17 / 14	8
20 / 18 / 12	
20 / 18 / 13	
20 / 18 / 15	9
21 / 19 / 13	
21 / 19 / 16	10
22 / 20 / 13	
22 / 20 / 17	11
23 / 21 / 14	
23 / 21 / 18	12
24 / 22 / 15	
25 / 23 / 17	

Fonte: Adaptado de (PARKER, SDP)

Figura 16 - Exemplo de amostras classificadas conforme ISO 4406 e NAS 1638: (a) óleo novo, de tambor ; (b) óleo novo de tanque de caminhão; (c) óleo novo, de mini reservatórios; (d) óleo requerido para instalações hidráulicas



Fonte: Adaptado de (HYDAC INTERNATIONAL, SDP)

3.11 RAZÃO BETA B_x

A razão beta é faz parte das do sistema de classificação de filtros com o objetivo de fornecer tanto ao fabricante e ao usuário uma comparação rigorosa e representativa entre vários meios filtrantes que existem. Representa a razão entre o número de partículas, por unidade de volume, acima de um tamanho específico na suspensão a montante do filtro para o mesmo parâmetro do fluxo a jusante do filtro, e é determinada por um dispositivo de ensaio que permite uma precisa contagem de partículas em ambas as regiões de fluxo. A razão beta é dada então por: (SUTHERLAND, 2008, p.22, tradução nossa).

$$\beta_x = \frac{N_m}{N_j} \quad (3)$$

Onde β_x é a razão beta para partículas maiores que $x \mu\text{m}$, N_m é o número de partículas por unidade de volume maiores que $x \mu\text{m}$ e a montante do filtro, N_j é o número de partículas por unidade de volume maiores que $x \mu\text{m}$ e a jusante do filtro. (SUTHERLAND, 2008, p.22, tradução nossa).

Segue-se que quanto maior for o valor de β_x , mais partículas de tamanho $x \mu\text{m}$ ou maiores serão retidas no filtro. A eficiência do filtro para este tamanho $x \mu\text{m}$ pode ser determinada a partir da razão beta e dada por: (SUTHERLAND, 2008, p.23, tradução nossa).

$$E_x = 100 \frac{(\beta_x - 1)}{\beta_x} \quad (4)$$

A razão Beta β_x e eficiência correspondente E são ilustradas na tabela 5, tais valores foram obtidos num ensaio onde o filtro foi submetido a um milhão de partículas por unidade de volume (partículas de mesmo tamanho).

Tabela 5 - Razão Beta e Eficiência de um filtro

Razão Beta e Eficiência de um filtro		
Razão Beta β	Eficiência E (%)	Nº Partículas a Jusante
1,0	0	1.000.000
1,5	33	670.000
2,0	50	500.000
10	90	100.000
20	95	50.000
50	98	20.000
75	98,7	13.000
100	99	10.000
200	99,5	5.000
1.000	99,9	1.000
10.000	99,99	100

Fonte: Adaptado de (SUTHERLAND, 2008)

3.12 EFICIÊNCIA DO FILTRO

A escala nominal de classificação dos filtros pode ser expressa em termos da eficiência mostrada. Dada em porcentagem, a eficiência pode ser calculada a partir da razão Beta, ou diretamente a partir da quantidade de partículas totais e retidas de tamanho $x \mu\text{m}$. (SUTHERLAND, 2008, p.24, tradução nossa).

$$E_x = 100 \frac{(N_m - N_j)}{N_m} \quad (5)$$

Tal equação é aplicada para todos os tamanho de partículas abaixo do valor de corte “cut-off”, valor no qual a quantidade de partículas que atravessam o filtro, N_j , deveria ser zero e portanto, a eficiência $E_{cut-off}$, 100 %. Para partículas de tamanho menores que o “cut-off” espera-se uma valor de eficiência menor que 100%. (SUTHERLAND, 2008, p.24, tradução nossa).

Métodos de medição de eficiência utilizam valores expressos em função da razão beta, assim com uma razão beta $\beta_x > 75$ resulta num filtro de eficiência 98,6% ou melhor, para uma determinada partícula de $x \mu m$.

3.13 PERMEABILIDADE DO FILTRO

A permeabilidade é o recíproco da resistência de escoamento no filtro, portanto, quanto maior a permeabilidade menor será a resistência e vice-versa. Permeabilidade é expressa normalmente em termos de um coeficiente de permeabilidade, que é diretamente proporcional ao produto da vazão do fluxo, à viscosidade do fluido, espessura do elemento filtrante, e inversamente proporcional ao produto da área de filtração e densidade do fluido. Esse cálculo resulta num coeficiente de permeabilidade por unidade de comprimento. (SUTHERLAND, 2008, p.25, tradução nossa).

Tantas derivações é embaraçoso, e o comportamento da permeabilidade é melhor expresso em forma de curvas relacionando queda de pressão no filtro (perda de carga) por vazão mássica de fluido que o atravessa. Uma serie de curvas pode ser criado de acordo com a propriedade a ser analisada, tais como:

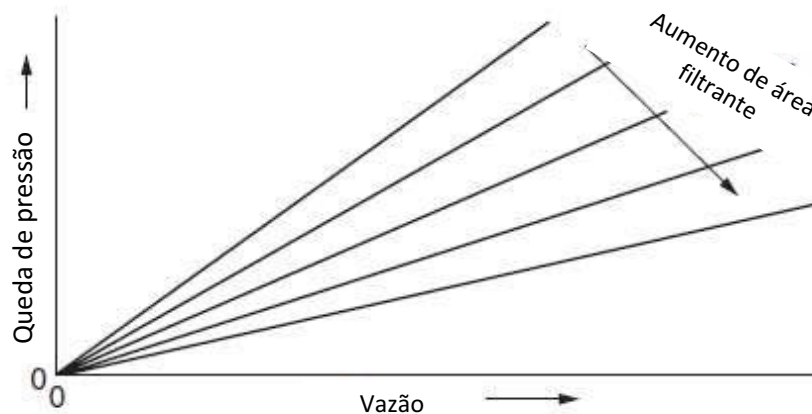
- Tamanho do filtro (área de filtração);
- Temperatura;
- Tempo de filtração (grau de contaminação do fluido a ser filtrado).

(SUTHERLAND, 2008, p.23, tradução nossa).

Uma típica curva existente é a que relaciona o tamanho do filtro, como visto na figura 17. Para uma dada vazão mássica, o aumento de área filtrante reduzirá a perda de carga no filtro, porque a quantidade de fluido atravessando o filtro por unidade de área reduzirá e a perda de carga é inversamente proporcional à área filtrante. Tal relação resulta num método padrão de dimensionamento da área filtrante de um filtro pelo valor da perda de carga

admissível no filtro (existente em todo projeto fluidodinâmico). Embora, vale ressaltar que aumento na perda de carga aumentará o tempo de filtragem a medida que a mídia se torna obstruída.

Figura 17 - Curva de área filtrante do filtro

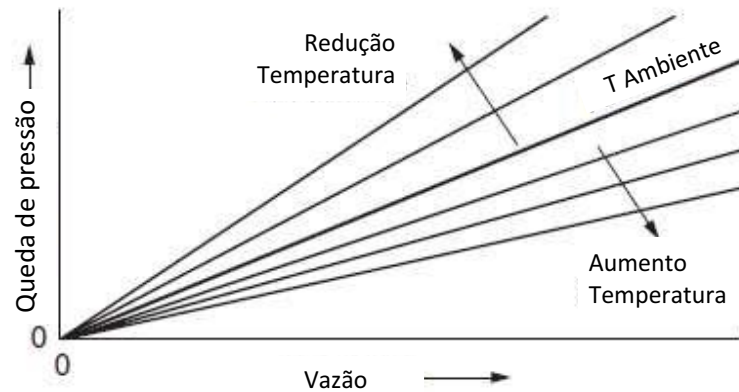


Fonte: Adaptado de (SUTHERLAND, 2008)

Se a espessura da mídia aumentar ao mesmo tempo em que a área filtrante, então uma curva diferente será produzida, uma vez que a mídia também impõe uma restrição ao fluxo. Cada elemento da mídia em individual tem sua própria curva de perda de carga dependendo de sua área, espessura e permeabilidade.

A temperatura de operação do fluido irá afetar a perda de carga no filtro, pois a viscosidade do fluido sofrerá mudanças. Um fluido menos viscoso irá sofrer uma menor resistência ao atravessar o meio filtrante, e por isso uma menor perda de carga. Como resultado, a queda de pressão é inversamente proporcional à temperatura, um decréscimo na temperatura causa um aumento na perda de carga, como mostrado na figura 18. (Deve-se notar que o efeito da temperatura é mais influente para líquidos do que gases).

Figura 18 - Curva variação de temperatura

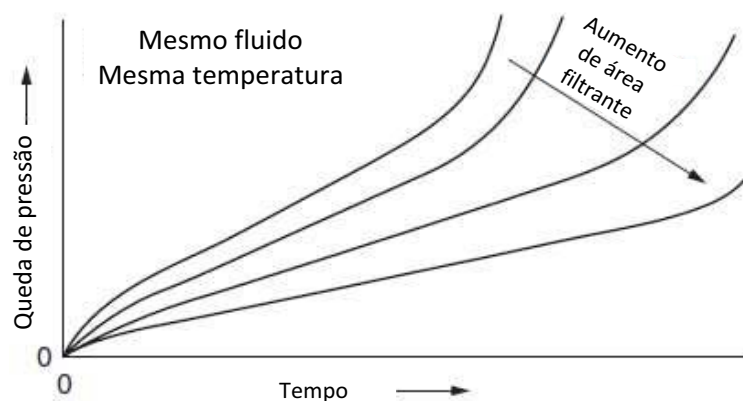


Fonte: Adaptado de (SUTHERLAND, 2008)

O impacto na velocidade do fluido não é o único efeito potencial causado pela variação de temperatura. A baixa temperatura, a água contida em meio a óleo pode congelar, causando obstrução ou até bloqueio parcial do filtro, gerando uma perda de carga anormalmente alta. Um efeito semelhante ocorre com ceras dissolvidas em óleo. Estas são mudanças que devem ser lembradas durante, por exemplo, uma aeronave em voo, navios percorrendo águas geladas, entre outros casos.

O efeito de um prolongado tempo de filtragem consiste em produzir um acúmulo de sólidos na superfície da mídia, reduzindo assim a permeabilidade (aumento da resistência à filtragem) a medida que aumenta a quantidade de sólidos retidos, assim como mostrado na figura 19, que representa outro tipo de curva para um filtro em individual.

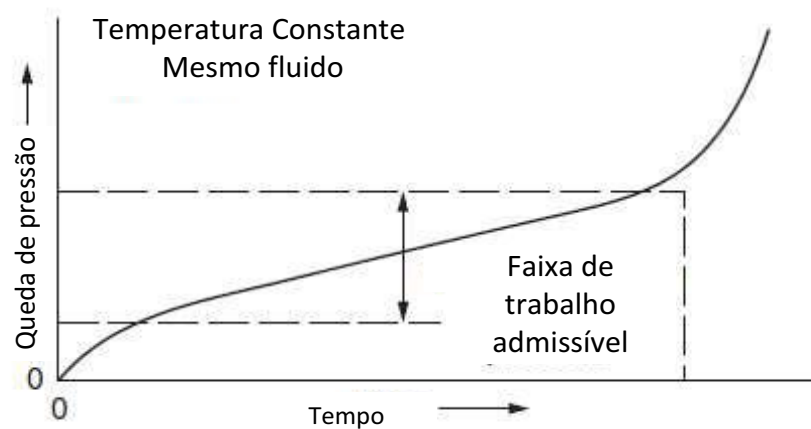
Figura 19 - Efeito do acúmulo de sólidos



Fonte: Adaptado de (SUTHERLAND, 2008)

Tais comportamentos mostrados na figura 19 anteriormente, não são particularmente úteis no dia a dia, pois filtros na pratica já foram dimensionados e a área de filtração é fixa. Assim é mais interessante plotar um gráfico *queda de pressão x tempo de filtração*, como mostrado na figura 20. A causa do aumento da perda de carga tem como causa o acúmulo de contaminantes, e essa quantidade retida pelo filtro durante seu ciclo de trabalho é significativo na escolha do tipo e tamanho do filtro e da mídia filtrante.

Figura 20 - Curva variação de temperatura.



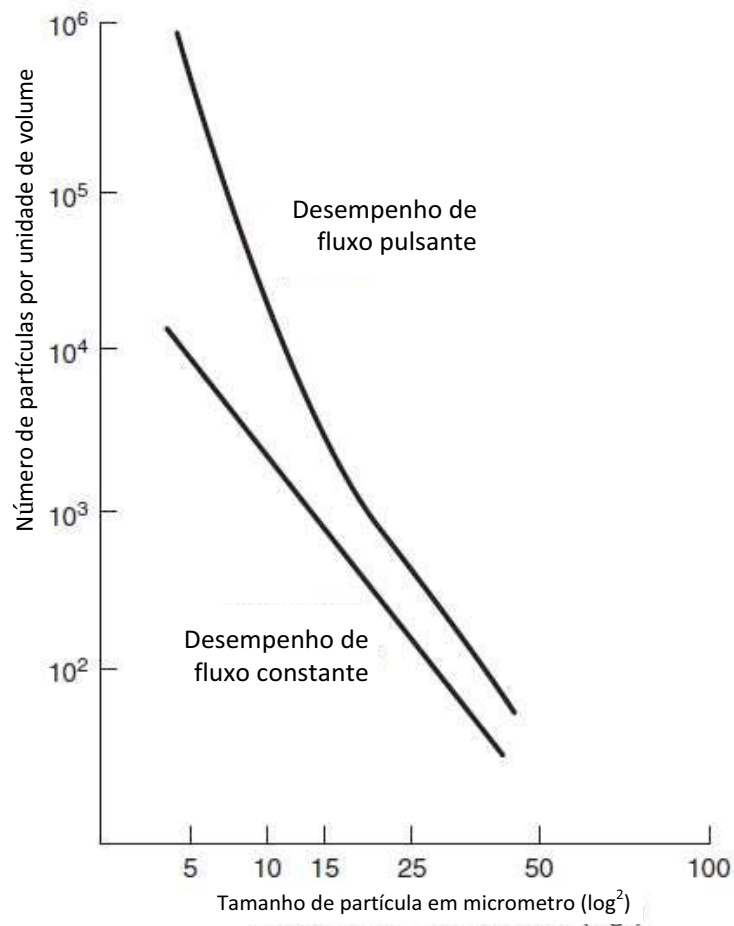
Fonte: Adaptado de (SUTHERLAND, 2008)

O formato de curva mostrado na figura 20 é bastante peculiar na engenharia. Ela mostra um aumento acentuado no início da filtração, tendendo a um período de crescimento quase linear, e em seguida volta a aumentar de forma acentuada. O ponto onde a perda de carga volta a crescer quase exponencialmente representa o momento em que o filtro deve ser substituído ou limpo, pois nesse momento sua eficiência é baixa e o custo de funcionamento se eleva demasiadamente. Nos filtros automáticos esse é o momento que os sistemas de retro lavagem, raspagem, entre outros métodos, são acionados a partir da leitura do valor da perda de carga por meio de pressostatos. Em alguns casos, durante a limpeza, o fluxo é direcionado para outro em stand-by.

3.14 EFEITO DE UM FLUXO PULSANTE

Um fluxo contínuo de fluido através de um filtro vai fazer com que se tenha uma acumulação constante de sólidos e variação estável na perda de carga. O efeito de um fluxo pulsante solta as partículas mais finas, retidas na torta, de modo a permitir que atravessem o filtro e se misture ao filtrado. Este efeito é ilustrado na figura 21, que mostra a quantidade de partículas por tamanho específico à jusante do filtro nos dois tipos de fluxo, constante e pulsante. É mostrado que há um maior número de partículas menores no fluxo pulsante. Essa é mais uma preocupação que se deve tomar na seleção de um filtro, diferentemente de testes em laboratório, na realidade fluxos pulsantes ocorrem ocasionalmente em fábricas em início de processos e os filtros mais refinados devem ser instalados de forma a compensar a facilidade em partículas menores atravessarem o filtro nesse estágio de forma a atingir a eficiência desejada. (SUTHERLAND, 2008, p.27, tradução nossa).

Figura 21 - Curva fluxo constante e pulsante



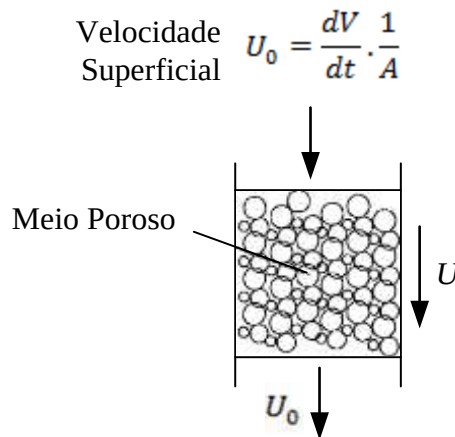
Fonte: Adaptado de (SUTHERLAND, 2008)

3.15 TEORIA BÁSICA DA FILTRAÇÃO

3.15.1 Fluxo de fluido através de um meio poroso

A relação fundamental entre a queda de pressão e o fluxo líquido que passa por um conjunto de partículas sólidas como mostrada na figura 22, foi reportado pela primeira vez por Darcy em 1856. O líquido atravessa os espaços existentes entre as partículas, por exemplo, os poros ou vazios existentes na camada. À medida que o fluido flui sobre a superfície do conjunto de partículas a perda de pressão ocorre devido a perdas por atrito. (RUSHTON; WARD; HOLDICH, 1996, p. 33, tradução nossa).

Figura 22 - Representação de um meio poroso

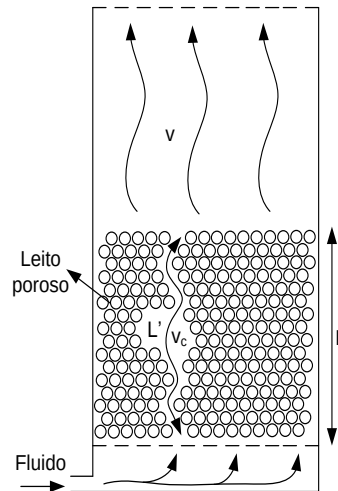


Fonte: Adaptado de (RUSHTON; WARD; HOLDICH, 1996)

A quantidade de sólidos dentro do bolo é muito importante; quanto maior esta for, maior será a superfície e camada que o fluido deverá atravessar resultando numa maior perda de carga devido aos maiores esforços de atrito. Num leito poroso existem vazios (zonas sem partículas) e a porosidade é definida como a razão entre o volume do leito que não está ocupado com material sólido (vazio) e o volume total do leito. Assim temos a porosidade ε de um elemento filtrante dada por: (RUSHTON; WARD; HOLDICH, 1996, p. 34, tradução nossa). A figura 23 ilustra a porosidade de um meio.

$$\varepsilon = \frac{\text{Volume Vazio}}{\text{Volume total do leito}} \quad (6)$$

Figura 23 - Representação da porosidade de um meio.



Fonte: Adaptado de (RUSHTON; WARD; HOLDICH, 1996)

Em muitas separações sólido-líquido o uso da concentração de sólidos é preferível à porosidade. Esta representa a razão do volume de sólidos existente num leito pelo volume total do leito. Assim a concentração de sólidos é dada por:

$$C = \frac{\text{Volume de solidos}}{\text{Volume total do leito}} \quad (7)$$

Assim, se juntarmos as equações (6) e (7), teremos:

$$C = 1 - \varepsilon \quad (8)$$

Darcy descobriu que a perda de pressão era diretamente proporcional à vazão de fluido [Darcy,1856], como se mostra na figura 24.

A constante de proporcionalidade da figura 24 é dependente da permeabilidade k da camada porosa. A lei de Darcy pode ser visto como um líquido que atravessa uma camada porosa assim como a Lei de Ohm da eletricidade para um fluxo de eletricidade num circuito fechado. (RUSHTON; WARD; HOLDICH, 1996, p. 34, tradução nossa).

A analogia ocorre da seguinte forma: a força motriz por trás do fluxo de fluido é perda de pressão por unidade de comprimento, a vazão ou velocidade do fluxo corresponde a corrente elétrica e a constante de proporcionalidade é a resistência elétrica ou a razão entre viscosidade e permeabilidade. Aumentando a viscosidade ou reduzindo a permeabilidade resulta no aumento da resistência ao fluxo do fluido.

Em qualquer situação envolvendo escoamento de um fluido é possível considerar que o arrasto na superfície ocorre devido a dois fenômenos: fricção de superfície (arrasto viscoso) e arrasto de forma.

O primeiro é o resultado da camada estacionária de líquido que ocorre na superfície do sólido, a perda de resistência ou de pressão é, por conseguinte, devido ao atrito entre o sólido e líquido. O arrasto de forma é devido a redemoinhos turbulentos que ocorrem em altas vazões de fluxo e variam na intensidade e direção. O arrasto de forma leva a perdas de pressão adicional sobre a de atrito e uma repartição da linearidade entre a taxa de vazão e queda de pressão. É comum separar os diferentes regimes de escoamento, ou a importância relativa dos tipos de arrasto, calculando o número de Reynolds modificado. A maioria das operações de filtração ocorrem em baixas vazões através dos meios porosos, assim, arrasto de forma não será levado em consideração. A lei de Darcy é válida somente sob essas condições.

Lei de Ohm:

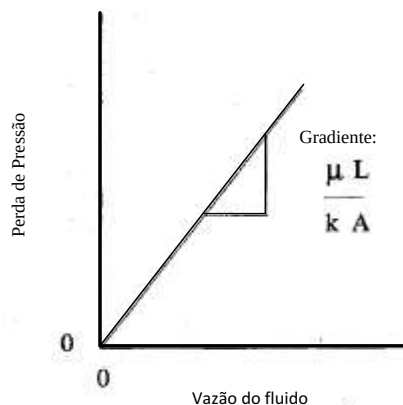
$$V = I \cdot R$$

Lei de Darcy:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu dV}{k dt} \cdot \frac{1}{A} \quad (9)$$

Onde V é a diferença de potencial, I é a corrente elétrica e R a resistência. E ΔP é a queda de pressão, L o comprimento do leito, μ é a viscosidade do fluido, dV é o volume filtrado num intervalo de tempo dt e A área da seção transversal do leito. A figura 24 mostra a Lei de Darcy graficamente.

Figura 24 - Relação entre perda de pressão e vazão do fluido de um fluido limpo através de um meio poroso fixo.



Fonte: Adaptado de (RUSHTON; WARD; HOLDICH, 1996)

3.15.2 Permeabilidade

A permeabilidade caracteriza a facilidade com a qual o líquido irá fluir dentro de um meio poroso, incluindo no interior das tortas. É, portanto, um parâmetro importante, que tem sido investigado por vários pesquisadores. Fatores que afetam a permeabilidade incluem o tamanho das partículas que compõem o meio poroso e a porosidade. A equação 10 é mais conhecida de permeabilidade e deve-se a Kozeny [1927]. (RUSHTON; WARD; HOLDICH, 1996, p. 36, tradução nossa).

$$k = \frac{\varepsilon^2}{K(1-\varepsilon)^2 S_v^2} \quad (10)$$

Onde S_v é a área específica da superfície por unidade de volume de partículas e K é a constante de Kozeny que normalmente assume valor de 5 em leitos fixos e lentamente em movimento e valor de 3,36 em leitos que se movem rapidamente. Substituindo a equação (10) anterior na lei de Darcy (equação (9)) resulta na equação Kozeny-Carman [1937]:

$$\frac{\Delta P}{L} = \mu \left[\frac{5(1-\varepsilon)^2 S_v^2}{\varepsilon^2} \right] \cdot \frac{dV}{dt} \cdot \frac{1}{A} \quad (11)$$

Outros pesquisadores investigaram também a relação da permeabilidade com a concentração e tamanho das partículas [Happel & Brenner, 1965].

Nos modelos matemáticos obtidos para a permeabilidade assume-se que as partículas são rígidas, de geometria fixa e em contato com outras partículas. Além disso, o arrasto do líquido e a pressão são considerados as únicas forças atuantes no sistema. Assim, qualquer outra força de corpo (gravitacional ou eletromagnética) existente sobre o leito causaria um desvio nos resultados para as modelos mostrados. Tais forças são significantes para partículas menores que 10 picômetros, sendo necessário um cuidado quando estudar sistemas com partículas de tais tamanhos. Este é um fato de conhecimento por Kozeny. Apesar de sua advertência muitos pesquisadores tem aplicado a equação de Kozeny-Carman para partículas menores e até mesmo macromoléculas submetidas à ultrafiltração. A maioria foi desapontada com a precisão do resultado obtido pelo modelo numérico. (RUSHTON; WARD; HOLDICH, 1996, p. 36, tradução nossa).

Na filtração, geralmente é possível deduzir empiricamente valores de permeabilidade a partir de testes laboratoriais ou de dados existentes de algumas operações. Na prática, a

permeabilidade da torta é em função da porosidade; tamanho, forma e distribuição das partículas; velocidade com que o bolo se forma; concentração da suspensão a ser filtrada; etc. Assim as relações teóricas para a permeabilidade devem ser usadas apenas como um guia para estimar a permeabilidade na ausência de dados operacionais. As permeabilidades medidas podem apresentar ordens de grandeza de duas casas decimais de diferença quanto às calculadas teoricamente. Isso é consequência do fato da equação não considerar todos os fatores que afetam a permeabilidade. Também é verdade que quanto mais finas as partículas suspensas e dispostas num leito mais largo, maior será o desvio do valor de permeabilidade teórico.

3.15.3 Filtragem de torta

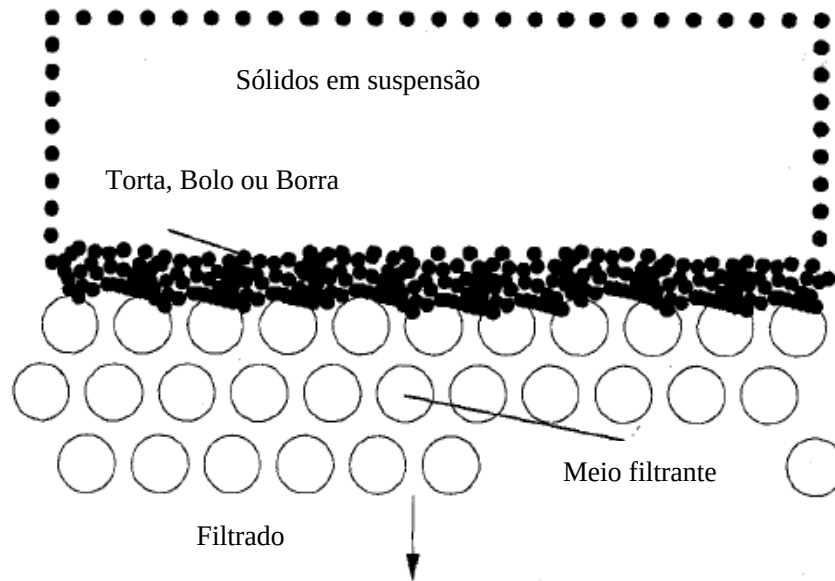
Este tipo de filtragem já foi mostrado durante a explicação sobre filtragem de superfície e profundidade. A figura 25 mostra a deposição de sólidos sobre o meio filtrante. A filtragem de torta ocorre por meio um mecanismo de retenção de partículas pelo material sólido já retido na superfície em combinação com os meios filtrantes, telas, panos, tecidos, etc.

A descrição matemática do processo inicia-se com a negligência de resistência do meio e utilização da lei de Darcy para relacionar taxas de fluxo de filtrado e a queda de pressão: (RUSHTON; WARD; HOLDICH, 1996, p. 37, tradução nossa).

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu dV}{k dt} \cdot \frac{1}{A} \quad (12)$$

Durante a filtragem a espessura da borra aumenta devido o aumento da deposição de sólidos na superfície do filtro. A mudança na espessura da torta é acompanhada por mudanças na vazão de fluido e queda de pressão, assim como o tempo de filtragem aumenta. Um material que apresenta permeabilidade de torta constante é em consequência de uma concentração constante de torta. Isso condiz com as equações de permeabilidade, que mostram que esta é função do tipo de sólido (tamanho) e porosidade (ou concentração). Um material que apresenta constante concentração de bolo é, portanto, incompressível e este tipo de filtragem é conhecida por filtragem de torta incompressível. A maioria dos conceitos aqui mostrados também é relevante para processos de torta compressíveis, que são considerados na elaboração das teorias básicas. (RUSHTON; WARD; HOLDICH, 1996, p. 37, tradução nossa).

Figura 25 - Esquema ilustrativo de um meio filtrante com torta na superfície.



Fonte: Adaptado de (RUSHTON; WARD; HOLDICH, 1996)

Para filtração do tipo torta incompressível a concentração se mantém constante, assim para cada unidade de volume de suspensão filtrado, o volume de torta aumenta numa quantidade uniforme e constante, da mesma forma o inverso também ocorre. A taxa de deposição de sólidos à torta não será, entretanto, uniforme por causa de que cada elemento novo da torta aumenta a resistência total à passagem do filtrado pelo filtro e bolo. Assim, como mostrada na figura 26, a taxa de filtração declina quando o meio é sujeito à pressão constante. A relação uniforme entre volume de torta e volume de filtrado é ilustrado na figura 27. A constante de proporcionalidade β pode ser usada para fornecer uma equação da espessura de torta, em qualquer instante do tempo: (RUSHTON; WARD; HOLDICH, 1996, p. 38, tradução nossa).

$$\beta = \frac{LA}{V} \quad (13)$$

Esta relação pode ser substituída na equação (12). Assim temos que:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A^2 \Delta P k}{\beta V \mu} \quad (14)$$

Assim esta equação (14) contém uma variável a menos que a equação (9), mas com uma constante a mais, β .

Evidentemente que a taxa de volume de bolo filtrado ainda precisa ser calculado antes da equação (14) ser estimada. Isto é obtido por meio de um balanço de massa dos sólidos e líquidos que entram no sistema.

Quantidade de sólidos na torta:	$CAL\rho_s$	(kg)
Quantidade de líquido na torta:	$(1 - C)AL\rho$	(kg)
Fração mássica de sólidos na alimentação do leito:	s	
Quantidade total do leito (sólido e líquido):	M	(kg)

Balanço de massa no líquido:

$$(1 - s)M = V\rho + (1 - C)\rho LA$$

Balanço de massa no sólido:

$$sM = C\rho_s LA$$

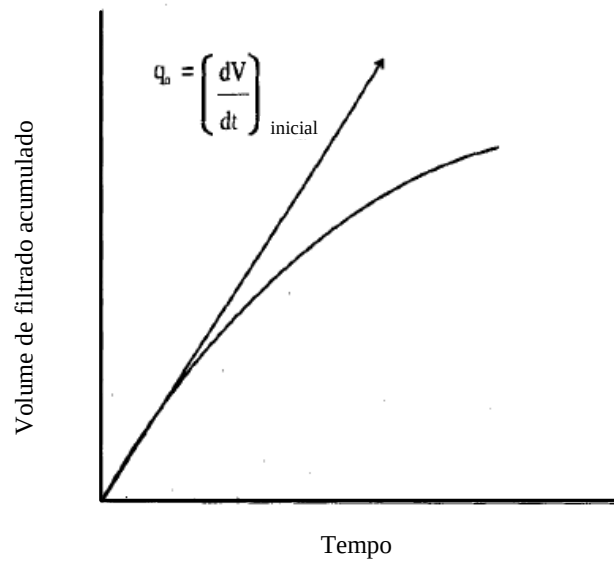
Quando combinamos tais balanços com a equação (13) e rearranjamos temos que:

$$\beta = \frac{s\rho}{(1-s)C\rho_s - s(1-C)\rho} \quad (15)$$

O uso da equação (15) assume o conhecimento de duas constantes (excluindo as densidades): fração mássica de sólidos na alimentação do leito (s) e concentração de torta por fração de volume (C). O primeiro é facilmente obtido por meio de amostragem, pesagem e secagem. A última é geralmente obtida pelos mesmos meios, porém com a necessidade de converter fração mássica para volumétrica.

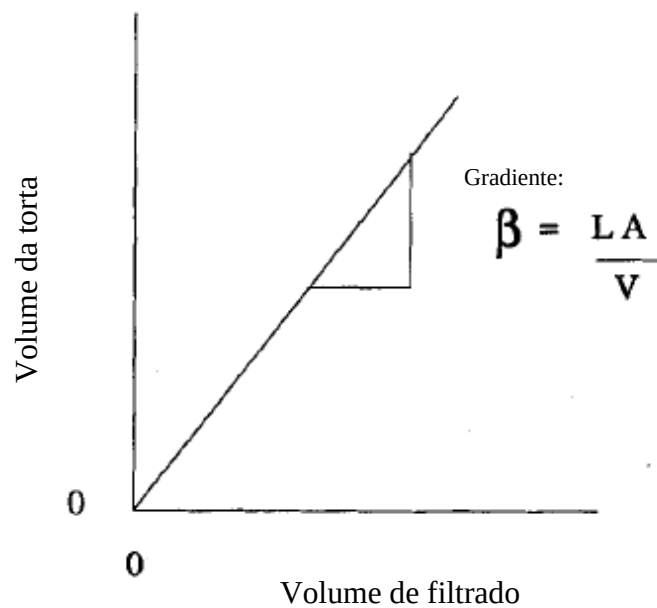
As figuras 26 e 27 mostram, respectivamente, o declínio da taxa de filtração (variação do volume de filtrado pelo tempo) sob pressão constante e a relação entre volume de filtrado e volume de torta.

Figura 26 - Declínio da taxa de filtração sob pressão constante



Fonte: Adaptado de (RUSHTON; WARD; HOLDICH, 1996)

Figura 27 - Relação entre volume de filtrado e volume de torta



Fonte: Adaptado de (RUSHTON; WARD; HOLDICH, 1996)

3.15.4 Quantidade de torta depositada por unidade de área e resistência específica

Um procedimento usual que parte da equação (14) é multiplicar ambos aos numeradores e denominadores pelo produto da concentração de sólidos e densidade, com rearranjo o resultado obtido é dado por:

$$\frac{dV}{dt} = \left(\frac{A}{\beta V C \rho_s} \right) \left(\frac{k C \rho_s}{1} \right) \left(\frac{A \Delta P}{\mu} \right) \quad (16)$$

Onde: $\frac{dV}{dt}$ é a taxa de volume filtrado, A é a área de filtração, β é a constante de proporcionalidade, V é o volume de filtrado, C concentração volumétrica de sólidos, ρ_s densidade do sólido, k permeabilidade da torta, μ viscosidade local e ΔP diferença de pressão.

A equação (13) também pode ser multiplicada pela concentração e densidade para obtermos:

$$L C \rho_s = \frac{\beta V}{A} C \rho_s$$

Note que $A L C \rho_s$, é a massa de sólido seco depositado na torta, assim a equação acima representa a massa de sólidos seco por unidade de área de filtro, e é normalmente expressa pelo termo w :

$$w = \frac{\beta V C \rho_s}{A} \quad (17)$$

A permeabilidade do bolo, a fração de concentração volumétrica e a densidade do sólido serão todos constantes para filtros de torta incompressíveis e podem, portanto, ser substituídos por uma única constante chamada de resistência específica α de unidade $m \cdot kg^{-1}$:

$$\alpha = \frac{1}{k C \rho_s} \quad (18)$$

Note que como a permeabilidade é análoga a condutividade elétrica e é lógico usar o termo resistência como sendo o inverso da condutividade de fluido, ou permeabilidade. Substituindo as equações (17) e (18) na equação (16) temos:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A \Delta P}{\mu w \alpha} \quad (19)$$

Esta representa a forma das equações diferenciais que serão usadas nas seguintes modelagens matemáticas para diferentes tipos de filtração. Deveríamos, contudo, ter em

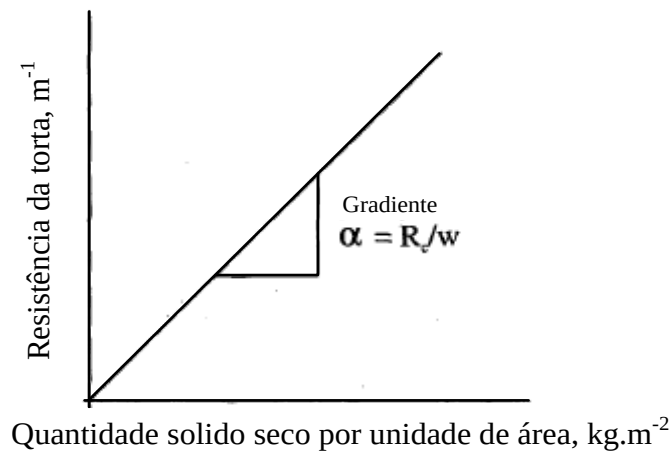
mente que o procedimento seguinte poderia ser usado na equação (14), mantendo a permeabilidade e usando a equação (15) para razão volumétrica de torta necessária para filtrar um dado volume de sólidos retidos.

A resistência física ou específica é ilustrada na figura 28 para somente quando a resistência da torta R_c é considerada na Lei de Darcy:

$$\Delta P = \mu R_c \frac{dV}{dt} \frac{1}{A} \quad (4)$$

Assim a resistência total à filtragem aumenta com o tempo devido ao aumento na deposição de sólidos na superfície do filtro “torta”. A taxa de crescimento da resistência é, contudo, linear a respeito da massa de sólido seco depositado por unidade de área de filtro. Então a resistência específica é a razão, ou gradiente, dos termos ilustrados na figura 28. (RUSHTON; WARD; HOLDICH, 1996, p. 38, tradução nossa).

Figura 28 - Resistência específica



Fonte: Adaptado de (RUSHTON; WARD; HOLDICH, 1996)

3.15.5 Concentração de Sólidos

Diferentes formas de concentração de sólidos podem ser mostradas e a necessidade de conversão de uma para outra ocorre essencialmente da necessidade de unificar os dados experimentais com os valores obtidos matematicamente. A forma mais usada para experimentalmente é em forma de fração de massa, C_w ou s , para a torta ou concentração do leito, respectivamente. Tais valores são obtidos a partir da secagem e pesagem de amostras. (RUSHTON; WARD; HOLDICH, 1996, p. 38, tradução nossa).

Concentração por fração de volume é obtida a partir da definição de densidade e alguns rearranjos matemáticos. Segue-se:

$$C = \frac{\text{Volume dos Sólidos}}{\text{Volume dos Sólidos} + \text{Volume dos Líquidos}} = \left(1 + \frac{(1-C_w)\rho_s}{C_w}\right)^{-1} \quad (20)$$

Concentração em termos de massa de sólidos por unidade de volume (C_{wv}) é obtido da seguinte forma:

$$C_{wv} = \frac{\text{Massa dos Sólidos}}{\text{Volume dos Sólidos} + \text{Volume dos Líquidos}} = \left(\frac{1}{\rho_s} + \frac{(1-s)}{sp}\right)^{-1}$$

Por último temos concentração de massa de sólidos por volume de líquido C_{wvl} :

$$C_{wvl} = \frac{\text{Massa dos Sólidos}}{\text{Volume dos Líquidos}} = \frac{sp}{(1-s)}$$

Assume-se em geral que w possa ser obtido a partir de C_{wvl} , como se segue:

$$wA = \text{Massa de sólido seco} = C_{wvl}V$$

Que rearranjado obtemos:

$$w = C_{wvl} \frac{V}{A} \quad (21)$$

Essa forma de cálculo desconsidera o líquido retido na torta. Assim tal cálculo representa uma aproximação subestimada do valor de w . O erro assumido será tão pequeno quanto menor for a concentração do bolo.

Para um tratamento mais rigoroso da massa de torta seca por unidade de área de filtragem é usual começar com a fração de mistura da própria torta, definida como:

$$m = \frac{\text{Quantidade de torta úmida}}{\text{Quantidade de torta seca}} = \frac{\text{Massa de torta sólida} + \text{Massa de torta líquida}}{\text{Massa de torta sólida}}$$

Assim:

$$m = \frac{CAL\rho_s + (1-C)AL\rho}{CAL\rho_s}$$

Dividindo tal expressão pelo conteúdo de torta seca temos:

$$m = 1 + \frac{(1-C)}{C} \frac{\rho}{\rho_s}$$

Combinando as equações (15) e (17) temos:

$$w = \left(\frac{C\rho_s s\rho}{(1-s)C\rho_s - s(1-C)\rho} \right) \frac{V}{A}$$

Que simplificando obtemos:

$$w = \left\{ \frac{\rho}{\left[\frac{1}{s} - 1 - \frac{(1-C)\rho}{C\rho_s} \right]} \right\} \frac{V}{A}$$

Substituindo nesta expressão a equação de fração para mistura da própria torta e rearranjando teremos a equação (22):

$$w = \left(\frac{s\rho}{1-sm} \right) \frac{V}{A} \quad (22)$$

A equação (22) é similar à equação (21) e é da forma:

$$w = c \frac{V}{A} \quad (23)$$

Onde c pode ser:

$$c = C_{wvl} \quad (24)$$

Ou:

$$c = \left(\frac{s\rho}{1-sm} \right) \quad (25)$$

A escolha de qual equação usar dependerá dos dados disponíveis e do grau de complexidade requerida para solução do problema. Em ambos os casos o termo de concentração de sólido (C_{wvl} ou s) no lado direito da equação se referem ao leite em si, e o

termo c será a constante para filtração de torta incompressível. Fisicamente, o termo c representa a massa de torta seca depositada por unidade de volume do filtrado. A equação (25), entretanto, irá variar em bolos compressíveis da mesma forma que m não será mais constante. As próximas tratativas matemáticas para manipulação do valor de w usarão por base a equação (23). A escolha de qual equação usar para obter c fica a cargo da situação existente e de escolha por parte do leitor.

A análise anterior mostra que o conhecimento da concentração de bolo de filtração é, por conseguinte, não essencial, mostrado através da equação (15), desde que a quantidade de líquido retido na torta é pequena. Este é um resultado útil por duas razões: a obtenção de uma amostra representativa da torta do filtro é muito mais difícil do que a da obtenção de uma amostra do leite todo bem misturado, e no teste de análise de dados que emprega um aumento da pressão, a obtenção de uma amostra da torta chega a ser impossível. Por esta razão, a equação (24) é a mais conhecida e usada na literatura.

3.15.6 Tipos de equações para filtração de torta

Substituindo a equação (23) na equação (19) teremos:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A^2 \Delta P}{\mu c V \alpha} \quad (26)$$

Onde: $\frac{dV}{dt}$ é a taxa de volume filtrado, A é a área de filtração, α é a resistência específica, V é o volume de filtrado, c concentração volumétrica de sólido seco, k permeabilidade da torta, μ viscosidade local e ΔP diferença de pressão.

Assim a equação (26) possui três variáveis e quatro constantes: tempo, volume do filtrado e pressão; área de filtração, viscosidade, concentração e resistência específica. As duas últimas são constantes para filtração de torta incompressível. Esta equação pode ser resolvida analiticamente somente se um das três variáveis permanecer constante. Isto reflete fisicamente no modo de operação dos filtros industriais. Filtros a vácuo tendem a operar sob pressão constante e a pressão de filtração geralmente sofre variação constante, pelo menos até um valor determinado de pressão ser atingido. Assim os seguintes modelos matemáticos são relevantes a estes casos de filtração.

3.15.6.1 Filtragem à Pressão Constante

Sob tais condições a equação (26) pode ser rearranjada e integrada as seguinte forma:

$$\int_0^t dt = \frac{\mu c \alpha}{A^2 \Delta P} \int_0^V V dV$$

Os limites de integração correspondem ao instante zero de filtragem (volume zero de filtrado) e determinado tempo t após o inicio de volume de filtrado V . Assim temos:

$$t = \frac{\mu c \alpha}{A^2 \Delta P} \frac{V^2}{2} \quad (27)$$

Derivando a equação (27) qualquer perda de pressão devido ao fluxo através do meio filtrante é ignorada. Esta suposição pode ser desconsiderada assumindo que a perda de pressão no meio ΔP_m pode ser adicionada a perda de pressão sobre a torta ΔP_c , resultando assim na perda total de pressão:

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_m \quad (28)$$

Assim podemos aplicar a lei de Darcy em ambos os lados:

$$\Delta P = \frac{\mu c \alpha}{A^2 \Delta P} V \frac{dV}{dt} + \frac{\mu L_m}{A K_m} \frac{dV}{dt} \quad (29)$$

Onde L_m e K_m representam o comprimento e permeabilidade da mídia filtrante, respectivamente. Caso estas duas variáveis permaneçam constante durante a filtração uma única constante conhecida por resistência do meio R_m de unidade m^{-1} pode ser definida por:

$$R_m = \frac{L_m}{K_m}$$

Esta expressão pode ser substituída na equação (29), que rearranjada e integrada resultará em:

$$\int_0^t dt = \frac{\mu c \alpha}{A^2 \Delta P} \int_0^V V dV + \frac{\mu R_m}{A \Delta P} \int_0^V V dV$$

Após integração e rearranjo desta expressão obtém-se uma equação conhecida por lei da velocidade parabólica.

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu c \alpha}{2A^2 \Delta P} V + \frac{\mu R_m}{A \Delta P} \quad (30)$$

Onde: V é o volume filtrado, t é o tempo de filtração, A é a área de filtração, α é a resistência específica, V é o volume de filtrado, c concentração volumétrica de sólido seco, k permeabilidade da torta, μ viscosidade local, R_m é a resistência do meio filtrante e ΔP diferença de pressão.

Tal equação apesar de ter denominação de parabólica representa uma reta, onde t/V é a variável dependente e V a variável independente. Com isso podemos plotar dados experimentais de t/V por V a fim de obtermos o gradiente e o ponto de intersecção da reta com o eixo ordinário [Ruth,1935].

O gradiente obtido e o ponto de intersecção correspondem respectivamente a:

$$\text{Gradiente} = \frac{\mu c \alpha}{2A^2 \Delta P} \quad (31)$$

$$\text{Intersecção} = \frac{\mu R_m}{A \Delta P} \quad (32)$$

Assim se a viscosidade do fluido, a área de filtração, pressão de filtração e a massa de torta seca por unidade de volume de filtrado forem conhecidas pode-se a partir dos valores gráficos a resistência específica da torta e a resistência específica do meio.

3.15.6.2 Filtração à Velocidade Constante

Este tipo de filtração ocorre comumente em sistemas que possuem eficientes bombas de deslocamento positivo que alimentam filtros de pressão. A bomba entrega um volume uniforme de fluido contaminado ao filtro, mantendo uma taxa constante de filtração desde que o material filtrado seja incompressível. A fim de atingir uma velocidade constante de filtração a pressão da bomba tem que aumentar conforme a resistência da torta aumenta com a deposição de particulado. É comum sistemas de filtração a pressão inserirem válvulas de alívio de pressão; se o ciclo de filtração for longo suficientemente, a velocidade de filtração

constante neste período será seguido de uma pressão constante após a abertura da válvula de alívio.

Velocidade constante de filtração é facilmente observada num gráfico de volume de filtrado por tempo de filtração, como ilustrado na figura 29.

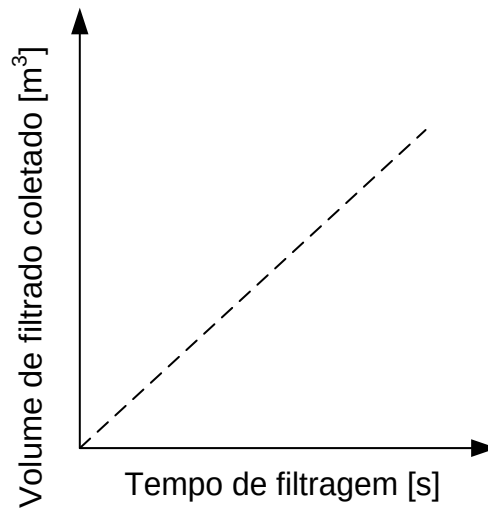
Sob as circunstâncias:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{V}{t} = \text{Constante}$$

E a partir da equação (20), podemos reorganizar esta de forma a obter:

$$\Delta P = \left(\frac{\mu c \alpha V}{A^2 t} \right) V + \left(\frac{\mu R_m}{A} \frac{V}{t} \right) \quad (33)$$

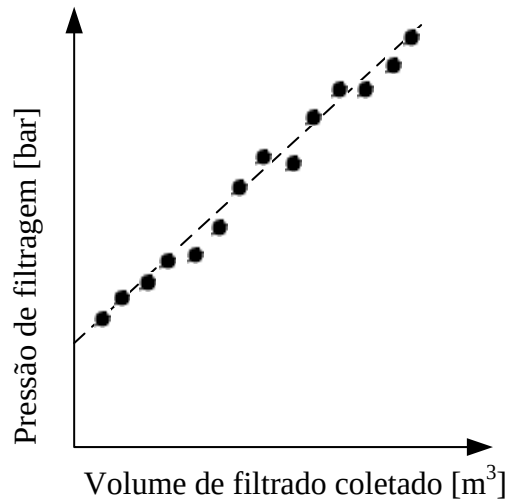
Figura 29 - Velocidade constante de filtração



Fonte: Adaptado de (RUSHTON; WARD; HOLDICH, 1996)

Assim segundo gráfico mostrado na figura 30 e equação (33) podemos obter os valores da resistência específica da torta e do meio, desde que viscosidade do fluido, a área de filtração, pressão de filtração e a massa de torta seca por unidade de volume de filtrado sejam conhecidas.

Figura 30 - Variação de pressão durante filtragem à velocidade constante



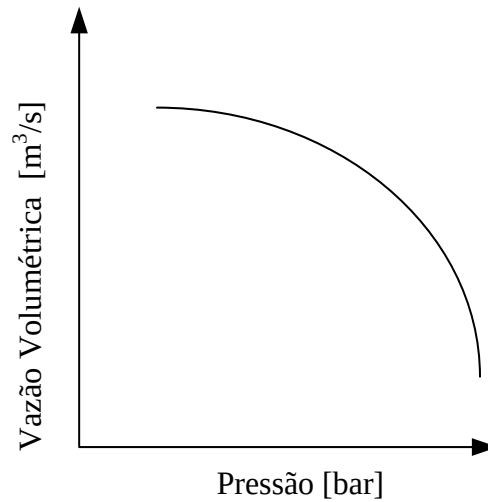
Fonte: Adaptado de (RUSHTON; WARD; HOLDICH, 1996)

Se a filtragem ocorrer sob pressão constante em certo período de tempo t , a lei de velocidade parabólica equação (30) pode ser aplicada, porém cuidados devem ser tomados na interpretação do significado do ponto de intersecção da reta com o eixo ordinário. Este valor já não é exclusivamente uma função da resistência do meio, mas sim uma função da resistência do meio e a resistência da torta formada em condições de velocidade constante.

3.15.6.3 Filtragem à pressão e velocidade variável

Um filtro à pressão alimentado por uma bomba que não seja de descolamento positivo fornece este tipo de filtragem. O exemplo mais comum é a de uma bomba centrífuga que alimenta filtros prensa ou placa. Sob estas circunstâncias a pressão entregue pela bomba aumenta conforme a vazão de fluido reduz. A vazão do fluido decresce em consequência do aumento da resistência total de filtragem devido ao aumento da espessura da torta. A descrição matemática deste processo depende da curva característica da bomba, assim como mostrada na figura 31.

Figura 31 - Curva característica típica de bombas centrífugas



Fonte: Adaptado de (RUSHTON; WARD; HOLDICH, 1996)

A vazão instantânea de fluido q é dado por:

$$q = \frac{dV}{dt} \quad (34)$$

Que pode ser substituída na equação (30) e ser rearranjada de forma a obter:

$$\frac{\Delta P}{q} = \frac{\mu c \alpha}{A^2} V + \frac{\mu}{AR_m} \quad (35)$$

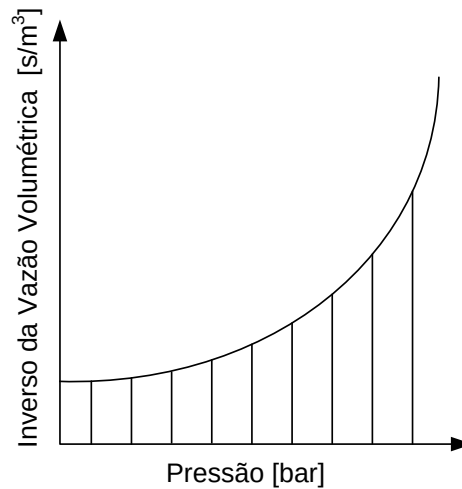
A curva característica da bomba fornece q em função da variação de pressão, e o valor do fluxo instantâneo dado numa pressão arbitrária obtido da curva pode ser usado na equação (34) rearranjada e em forma de integral:

$$t = \int \frac{dV}{q} \quad (36)$$

O volume de filtrado usado na equação anterior é obtido da equação (35). O procedimento é melhor ilustrado pela tabela 6.

O gráfico da figura 32 foi construído com os valores mostrados na coluna 3 e 4 da tabela 4, e a interpretação gráfica desta é usada para completar a ultima coluna da tabela 4.

Figura 32 - Inverso da vazão instantânea pelo volume de filtrado



Fonte: Adaptado de (RUSHTON; WARD; HOLDICH, 1996)

Tabela 6 - Ilustração do tempo requerido para afetar a velocidade e pressão da filtração

Ilustração do tempo requerido para afetar a velocidade e pressão da filtração.				
1	2	3	4	5
Variação da Pressão (ΔP)	Vazão (q)	Volume de filtrado coletado (V)	Inverso da Vazão (q^{-1})	Tempo (t)
Característica da bomba	Equação (35)		A partir da coluna 2	Figura 32

Fonte: Adaptado de (RUSHTON; WARD; HOLDICH, 1996)

Da equação (35) observamos que se plotarmos $\Delta P/q$ por V deveremos obter uma reta com as resistências influenciando o gradiente e o ponto de intersecção da reta com o eixo ordinário.

3.16 SISTEMAS DE FILTRAGEM DE COOLANT EM OPERAÇÕES DE USINAGEM

A maior parte das operações que envolvem alguma usinagem ou remoção de material metálico necessita o uso de coolant para lubrificação da superfície entre a ferramenta de corte e a peça, além de dissipar calor do processo de corte. Outras vantagens do uso de coolant são a remoção de cavacos da área de trabalho e proteção contra corrosão. A escolha mais comum em operações de usinagem é o coolant do tipo emulsão de óleo e água, o teor de óleo

proporciona certa lubrificação e a água age como agente principal de arrefecimento. Outro fluido de corte usado em processos de corte de metais é o óleo integral, geralmente aplicado em operações que exigem uma maior precisão dimensional e rugosidade com cavacos muito pequenos.

Diversas atividades requerem equipamentos de filtragem para seu funcionamento, entre algumas das operações estão:

- Retificação;
- Fresamento;
- Mandrilamento;
- Brunimento;
- Rebaixamento;
- Alargamento;
- Furação;
- Aplainamento;
- Torneamento;
- Tratamentos galvânicos;
- Tratamentos térmicos;
- Eletro erosão por penetração e fio
- Lavagem de peça;
- Recuperação e tratamento dos óleos.

Uma série de líquidos é usada na indústria metalúrgica para resfriamento e lubrificação dos processos, incluindo:

- Emulsões;
- Soluções sintéticas;
- Óleos de retífica;
- Óleos de brunimento;
- Óleos de corte;
- Óleos de laminação;
- Óleos de têmpera;
- Querosene;
- White spirit;
- Solventes de lavagem;
- Líquidos dielétricos;
- Banhos de galvanização.

A água é, certamente, acrescentada na maioria dos líquidos criando soluções diluídas e principalmente nos casos com compostos orgânicos voláteis, devido à necessidade de reduzir a emissão de COVs¹⁷ à atmosfera.

Na maioria dos casos, coolant estão inseridos em sistemas de circulação, ou dedicado á uma máquina individual ou à um sistema central que abastece um grande numero de máquinas. A qualidade do coolant deteriora-se nesse sistema de circulação devido a:

- Contaminação por sujeiras, pedaços de metal, cavacos, fagulhas e líquidos intrusos como água nos coolant a base de óleo ou água;
- Degradação por bactérias introduzidas no coolant por meio da poluição atmosférica, bactérias impregnadas no metal durante estocagem e por meio de agua impuras adicionados como diluentes;
- Evaporação da agua existente nos coolant a base de água, resultando no aumento da concentração de minerais dissolvidos.

A deterioração das propriedades do coolant pode levar à perda de precisão no trabalho, reduzindo a tempo de vida das ferramentas, desgaste maior nas peças, necessidade de reposição frequente de coolant e um desagradável ambiente de trabalho como odores e névoas levando risco de causar doenças de pele. Uma limpeza eficaz de todo o sistema de circulação antes da introdução do coolant novo, métodos eficientes de filtragem e purificação de coolant são aconselháveis de forma a reduzir os gastos operacionais de fabricação e manter a qualidade dos processos, sendo um bom investimento para a fábrica.

Ambientes onde o volume de fluido de corte é usado em demasiada quantidade, por exemplo, uma fábrica de motores e transmissão que exige diversas etapas de usinagem até a obtenção do produto final, sistemas centrais de filtragem são mais adotados do que sistemas individuais.

3.17 TRATAMENTO DE COOLANT A BASE DE ÁGUA

Coolant a base de água são óleos solúveis em forma de emulsão em água, com certos aditivos necessários como emulsificadores, agentes dispersantes, anticorrosivos, antiespumantes e bactericidas, um coquetel de substancias químicas que explica a importância em limpar e renovar o líquido quando sujo ao invés de jogá-lo fora. O primeiro passo para uma manutenção de coolant a base água de boa qualidade é uma mistura correta. Numa boa

¹⁷ Compostos orgânicos voláteis (COVs) são compostos orgânicos que possuem alta pressão de vapor sob condições normais a tal ponto de vaporizar significativamente e entrar na atmosfera.

emulsão, as gotículas de óleo devem possuir diâmetro por volta de 1 μm (um micron), e positivamente carregadas para repulsão mútua de forma a manter um estado coloidal de suspensão.

À água usada deve adicionar carbonato de sódio a fim de evitar que íons estrangeiros destruam a carga superficial das gotículas e permitindo a coalescência. O óleo é que deve ser misturada à água, não vice-versa, e as duas fases líquidas devem ser misturadas rapidamente para evitar a formação de espuma.

Para manter o coolant num estado limpo, o sistema de filtragem deve proporcionar um sistema de remoção contínua de contaminantes a permitir que as menores “assentem-se” fora do fluxo de escoamento. As impurezas sólidas em fluidos de corte a base de água são geralmente maiores que os presentes em fluidos de corte oleosos como em operações de retíficas.

As principais vantagens do uso de coolant de emulsão sobre os óleos integrais são:

- Maior redução de calor, permitindo velocidades maiores de usinagem;
- Ambiente de trabalho mais limpo;
- Mais econômico, a diluição com água reduz o custo final;
- Melhor aceitação dos operários, menor temperatura e mais “limpo”;
- Melhores condições de saúde e segurança, sem risco de incêndios e redução de névoa.

3.18 PROJETO DE SISTEMAS DE FILTRAGEM DE COOLANT

O projeto de filtros ou separadores para fluidos de corte de máquinas de usinagem é extremamente complexo e com diversos parâmetros. Alguns dos aspectos gerais que devem ser considerados antes um projeto preliminar são:

1. O propósito ou necessidade do filtro;
2. Viscosidade e propriedades associadas ao coolant a ser filtrado;
3. O tipo de operação de usinagem ou corte envolvido no processo;
4. O grau de separação ou filtragem requerido;
5. A vazão de fluido requerida no processo;
6. A capacidade do sistema de filtragem;
7. Os tipos de máquina-ferramenta e suas características físicas como altura das conexões, operação, etc;
8. O tipo de material do produto produzido;

9. Área física disponível para o sistema;
10. Taxa de produção de material cortado, cavaco, etc.;
11. Eficiência e custo benefício desejável em função quantidade de material produzido;
12. Período de funcionamento afetando a estabilidade da produção, flexibilidade e durabilidade do sistema;
13. Dispositivos de proteção a serem incorporados no sistema a fim de suportar um mau uso ou falhas mecânicas;
14. Dispositivos de segurança garantindo que o sistema atenda as normas regulamentadoras de segurança e saúde do trabalho de acordo com a legislação local.

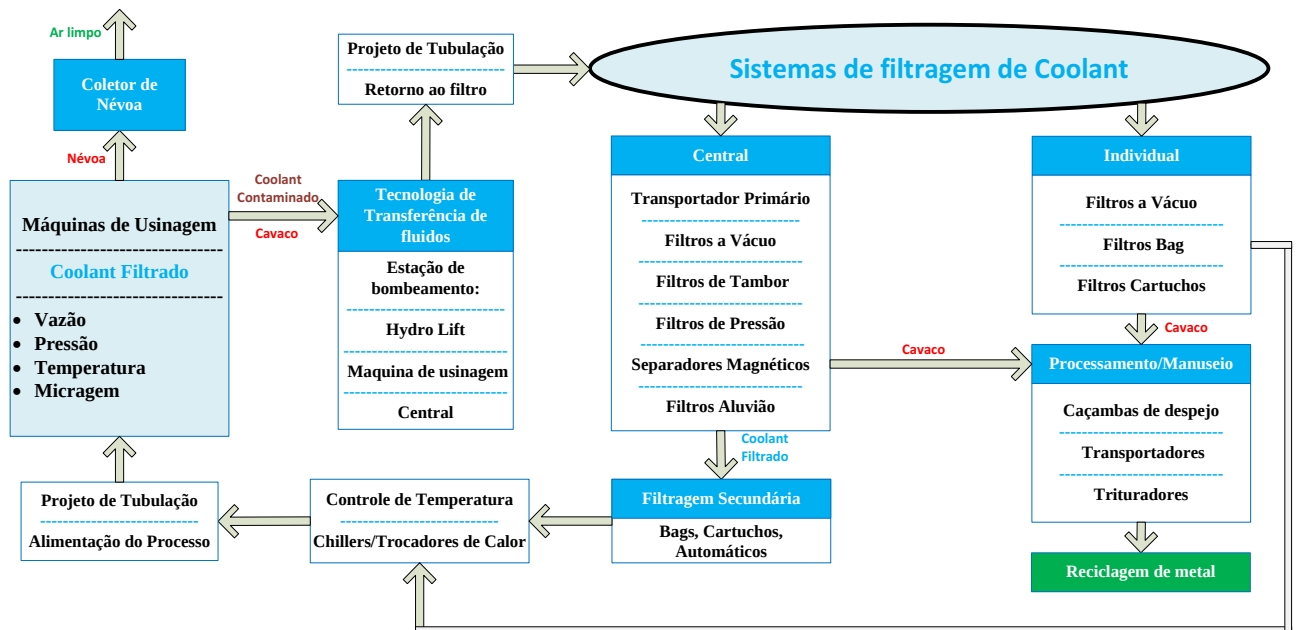
A gama de máquinas atualmente em produção é diversa e extensa. O projetista dos sistemas de filtragem deve variar a especificação desde um equipamento singular, de pequeno porte e baixa capacidade de produção de cavacos até sistemas complexos com multi estágios que requerem avaliação física do local a ser instalado, aliado a um estudo especial dos requisitos individuais das máquinas ligadas ao sistema. Este poderia ser chamado de sistema central de filtragem servindo varias máquinas de uma mesma linha de manufatura, ou até todas as máquinas de um site fabril. Sistemas centrais possuem todo um sistema de salvaguardar a produção por meio de bombas em stand-by, monitores de nível, alarmes e sistemas de backup que cubra qualquer falhar elétrica ou mecânica.

3.19 TIPOS DE SISTEMAS DE FILTRAGEM DE COOLANT

Como citado anteriormente, os diversos parâmetros que influenciam no projeto de sistemas de filtragem de coolant resulta numa variedade de tipos de sistemas com características as vezes muito peculiares a um determinado processo industrial. Este trabalho focará apenas nos sistemas populares em ambientes fabris automotivos mais precisamente numa fábrica de usinagem de componentes Powertrain.

A figura 33 mostra alguns dos principais tipos se sistemas de coolant e outros componentes que fazem parte do sistema integrando o filtro às máquinas. Da figura observamos que basicamente existe dois tipos de sistemas, os centrais e os individuais.

Figura 33 - Esquema de um sistema de filtragem de coolant



Fonte: Adaptado de (FILTRA SYSTEMS, SDP)

A diferença principal entre os dois tipos está na capacidade de filtragem do sistema. Os individuais, como já indica o nome, atende máquinas unitárias ou em pares e trios de usinagens bem próximas. Os sistemas centrais ou regionais são sistemas que atendem uma série de máquinas e geralmente se posiciona nos extremos da fábrica para atender um layout de processo.

Os tipos de sistemas mostrados neste trabalho correspondem àqueles tecnicamente aprovados para operarem numa fábrica automotiva de alta produtividade, tendo como referência a especificação técnica global da General Motors Company.

3.19.1 Sistema individual de filtragem

Um sistema de filtragem individual é definido como qualquer filtro de fluido refrigerante que serve somente uma única máquina e é classificada em duas categorias como “Self-Contained” ou “Stand Alone”.

Self-Contained é aquele filtro que recebe o coolant sujo diretamente da máquina por meio de fluxo induzido pela gravidade, e os controles estão contidos no painel da máquina. O filtro é essencialmente um componente removível da máquina de produção.

Stand Alone é aquele que recebe o coolant sujo por meio de um fluxo induzido por gravidade ou um dispositivo intermediário, tal como uma bomba numa estação, e possui seu

próprio painel de controle separado da máquina de produção. Em algumas circunstâncias excepcionais um filtro Stand Alone pode servir mais de uma máquina de mesma operação de produção, geralmente muito próximas uma das outras.

A seleção de qual tipo de sistema usar deve se basear nos seguintes critérios:

- O nível de filtragem exigido para o funcionamento da máquina de acordo com seu determinado processo ou de acordo com especificação técnica de projeto por parte do Engenheiro de Planta responsável;
- Tipo de operação de usinagem;
- Vazão requerida pela máquina ou processo;
- Material usinado;
- Leiaute do espaço disponível e modelo da máquina de usinagem.

Há diversos sistemas individuais aprovados pela General Motors Corporation em todo o mundo. Entre eles estão filtros a tambor, magnéticos, a vácuo, a pressão, automáticos, ciclones, entre outros com sistemas secundários para garantir as especificações de limpeza do coolant. Um exemplo de um modelo Self Contained com suas aplicações e características é mostrado na tabela 7.

Este sistema pode ser aplicado em operações do tipo desbaste, fresamento, furação, rosqueamento, furacão a alta pressão, alargamento, em máquinas que requerem coolant do tipo emulsão que trabalham principalmente com alumínio, aço, metais maleáveis e dúcteis, ferro nodular, cinza ou fundido.

O tempo de retenção mostrada na tabela representa o tempo necessário para troca de todo o volume existente nos tanques limpos e sujos. Assim,

$$\text{Tempo de retenção [min]} = \frac{\text{Volume operacional dos tanque limpo e sujo [l]}}{\text{Vazão máxima de coolant do tanque limpo [l/min]}}$$

Tabela 7 - Modelo de filtro Self Contained do tipo tambor rotativo com indexação automática e mídia permanente com sistema secundário de filtragem opcional de aço inoxidável e estação opcional de refinamento do filtrado

Especificações de um sistema de filtragem do tipo tambor rotativo									
Material	Alumínio, Aço, Metais			Ferro Fundido			Ferro Nodular		
Tipo Coolant	Emulsão a base de água	Óleo integral 50 SSU	Tempo de Retenção	Emulsão a base de água	Óleo integral 50 SSU	Tempo de Retenção	Emulsão a base de água	Óleo integral 50 SSU	Tempo de Retenção
Vazão Tempo	LPM/M ²	LPM/M ²	Minutos	LPM/M ²	LPM/M ²	Minutos	LPM/M ²	LPM/M ²	Minutos
Escala	Filtro tambor rotativo								
50 µm Nominal	2125	1600	3-5	1530	1150	3-5	1700	1280	3-5
Escala	Filtro secundário de aço inoxidável								
75 µm Nominal	1120	N/A	N/A	440	N/A	N/A	680	N/A	N/A
Escala	Estação regional opcional de sistema de refinamento (10-15 % da vazão nominal da máquina)								
15 µm Nominal	400-480	N/A	5-7	400-480	N/A	5-7	400-480	5-7	N/A

Fonte: Adaptado de (GENERAL MOTORS, 2014)

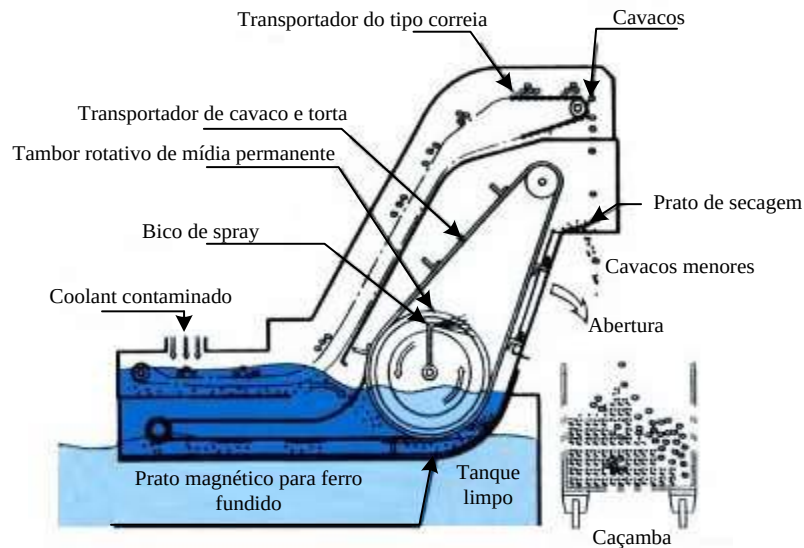
As figuras 34 e 35 ilustram um sistema real e o seu mecanismo de funcionamento, respectivamente.

Figura 34 - Ilustração de um sistema de filtragem a tambor rotativo



Fonte: (BARNES INTERNATIONAL, SDP)

Figura 35 - Mecanismo de funcionamento de um sistema de filtragem a tambor rotativo



Fonte: Adaptado de (BARNES INTERNATIONAL, SDP)

3.19.2 Sistema central de filtragem

Os sistemas centrais de filtragem, também denominados de regionais, se diferenciam dos individuais quanto a capacidade de filtragem estando este ligado a diversas máquinas que utilizam fluido refrigerante. Alguns destes sistemas regionais possuem capacidade de filtragem de até 40.000 l/min e dependendo do tipo de filtro escolhido uma escala nominal de filtragem na faixa de 10 μ m a 80 μ m. As principais vantagens de um sistema central de filtragem são:

- Downtime reduzido

Custo de limpeza e reposição de coolant são menores e menos frequente e ocorre de uma única vez para um conglomerado de máquinas ligadas no sistema.

- Melhor Controle

Uma única pessoa fica responsável por controlar a concentração do coolant por meio de coleta de dados e aplicar eventuais ações ao invés de diversos operadores controlando a qualidade do coolant por máquina.

- Aumento da vida útil do coolant

A remoção de cavaco em conjunto a uma aeração do fluido reduz a taxa de crescimento de bactérias anaeróbicas que produz odores desagradáveis e deteriora as propriedades do coolant exigindo constantes reposições.

- Economia de custo operacional

Um fluido limpo num sistema representa menor desgaste, reparo e trocas dos componentes, aumento da vida útil das ferramentas de corte. Além de evitar reposições frequentes de coolant no sistema que representa um alto custo.

Os sistemas centrais de filtragem também possuem suas desvantagens. Uma delas é a baixa flexibilidade em instalar e mover o sistema pelo grande porte. Alto custo de investimento em sistema de tubulação e bombeamento para transportar coolant para diferentes locais da fábrica. Outra é que o fluido tem que ser capaz de atender especificações de uma variedade de máquinas que realizam operações diferentes. Esta limitação pode ser minimizada agrupando diferentes máquinas por operações similares como, por exemplo, sistemas exclusivos para usinagem de desbaste e outros para máquinas que realizam retificação e brunimento que produzem cavacos de menor tamanho e exigem um alto nível de acabamento superficial.

Assim como para sistemas de filtragem individual, há uma série de critérios a ser considerados para seleção de um determinado tipo de filtro:

- O nível de filtragem exigido para o funcionamento da máquina de acordo com seu determinado processo ou de acordo com especificação técnica de projeto por parte do Engenheiro de Planta responsável;
- Tipo de operação de usinagem;
- Vazão requerida pela máquina ou processo;
- Material usinado;
- Layout do espaço disponível e modelo da máquina de usinagem.

Usando como referência as especificações globais técnicas da General Motors Company, existe pelo menos seis tipos de sistemas regionais aprovados para atenderem as especificações de fabricação de motores e transmissão.

1. Sistema a vácuo de mídia permanente com filtro secundário de aço inoxidável e filtro de refinamento de mídia de rolo.
2. Sistema a vácuo permanente de único tanque com mídia permanente ou descartável com filtragem secundária com filtros de aço inoxidável automático ou do tipo Bag.
3. Sistema a vácuo com mídia descartável e filtragem secundária dupla com filtros Bag.
4. Sistema a pressão do tipo aluvião com filtro secundário de aço inoxidável.
5. Sistema a pressão com mídia descartável e filtragem secundária dupla com filtros Bag.

6. Sistema a tambor por indexação a gravidade de mídia permanente com filtragem secundária com filtros de aço inoxidável ou filtragem modular nas máquinas.

Como cada sistema possui suas próprias aplicações e muitas peculiaridades, iremos focar somente em um sistema para um maior aprofundamento. O sistema utilizado para estudo será o terceiro mostrada acima, sistema a vácuo com mídia ou elemento filtrante descartável com filtragem secundária, necessária para reduzir a micragem do sistema, com filtro do tipo Bag.

A tabela 8 mostra dados de especificação de um sistema de filtragem à vácuo com mídia descartável e filtragem secundária com filtros automáticos (retro lavagem) de aço inoxidável (elemento filtrante).

Tabela 8 - Modelo de sistema de filtragem a vácuo com mídia descartável e filtragem secundária com filtros automáticos de aço inoxidável

Especificações de um sistema de filtragem a vácuo com filtragem secundária com filtros automáticos de aço inoxidável									
Material	Alumínio, Aço, Metais			Ferro Fundido			Ferro Nodular		
Tipo Coolant	Emulsão a base de água	Óleo integral 50 SSU	Tempo de Retenção	Emulsão a base de água	Óleo integral 50 SSU	Tempo de Retenção	Emulsão a base de água	Óleo integral 50 SSU	Tempo de Retenção
Vazão Tempo	LPM/M ²	LPM/M ²	Minutos	LPM/M ²	LPM/M ²	Minutos	LPM/M ²	LPM/M ²	Minutos
Escala	Filtro a vácuo com mídia descartável								
50 µm Nominal	400-480	240-320	5-6	240-320	160-240	5-6	320-400	160-240	4-6
Escala	Filtro secundário de aço inoxidável								
75 µm máximo	1120	1120	N/A	440	440	N/A	680	680	N/A
30 µm Nominal									

Fonte: Adaptado de (GENERAL MOTORS, 2014)

Em comparação com o sistema individual mostrado, a vazão por unidade de área é menor, porem estes sistemas possuem áreas de até 500 vezes maior que os sistemas individuais, assim a vazão nominal destes sistemas centrais supera em muito os individuais.

Este sistema a vácuo mostrado pode ser aplicado em diferentes operações de usinagem de aço, alumínio, ferro fundido, nodular e compostos metálicos que exigem um grau maior de filtragem devido às operações ser mais precisas e sensíveis exigindo alto grau de acabamento.

As especificações da quantidade e tamanho dos contaminantes no fluido que irá para o processo são mostradas na tabela 9:

Tabela 9 - Especificação da composição e tamanho dos contaminantes no fluido

Especificação da composição e tamanho dos contaminantes no fluido.	
Tamanho da partícula	Max. Concentração: PPM=mg/l
Maior que 8 µm	5 PPM – 10 PPM
Entre 1 µm e 8 µm	50 PPM – 100 PPM
Média do tamanho das partículas	< 50 µm Desbaste , < 20 µm Acabamento
Tamanho máximo de partícula	75 µm para operações críticas de acabamento com passagem de coolant ou orifício de descarga de 6mm de diâmetro.

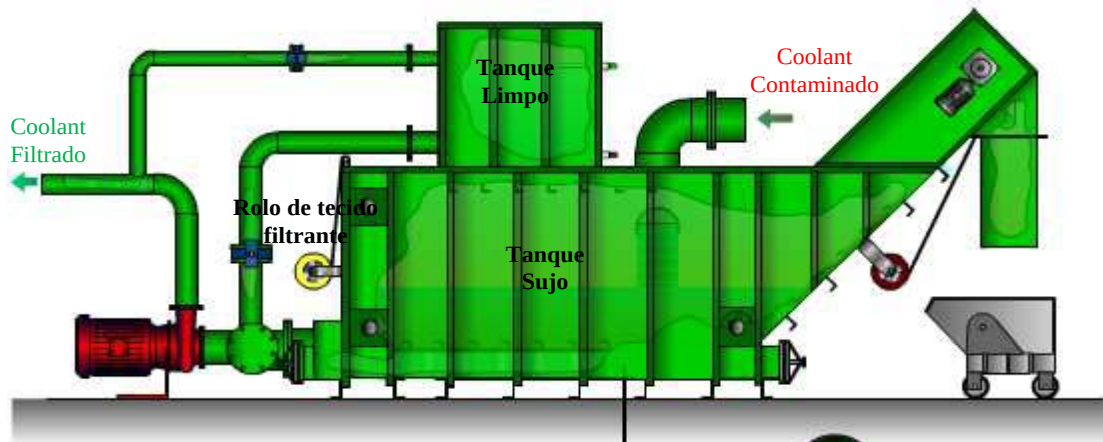
Fonte: Adaptado de (GENERAL MOTORS, 2014)

A forma de calcular o tempo de retenção é igual ao dos sistemas individuais. Um adendo a esse tipo de filtragem corresponde ao dimensionamento do volume de tanque sujo, que armazena o fluido oriundo do processo. Este deve ser:

$$\text{Volume Tanque Sujo} = \text{tempo de retenção} \times \text{vazão das bombas} + 100\% \text{ do volume total tubulação do sistema} + \text{volume do tanque limpo}$$

A figura 36 mostra um sistema de filtragem à vácuo de mídia descartável. O coolant contaminado entra na parte superior oriundo do processo ou de um pré-separador de partículas maiores existentes em alguns sistemas. E o coolant filtrado deixa o sistema principal rumo à filtragem secundária e assim de volta as máquinas. O funcionamento deste sistema pode ser dividido em três momentos principais:

Figura 36 - Sistema de filtragem a vácuo

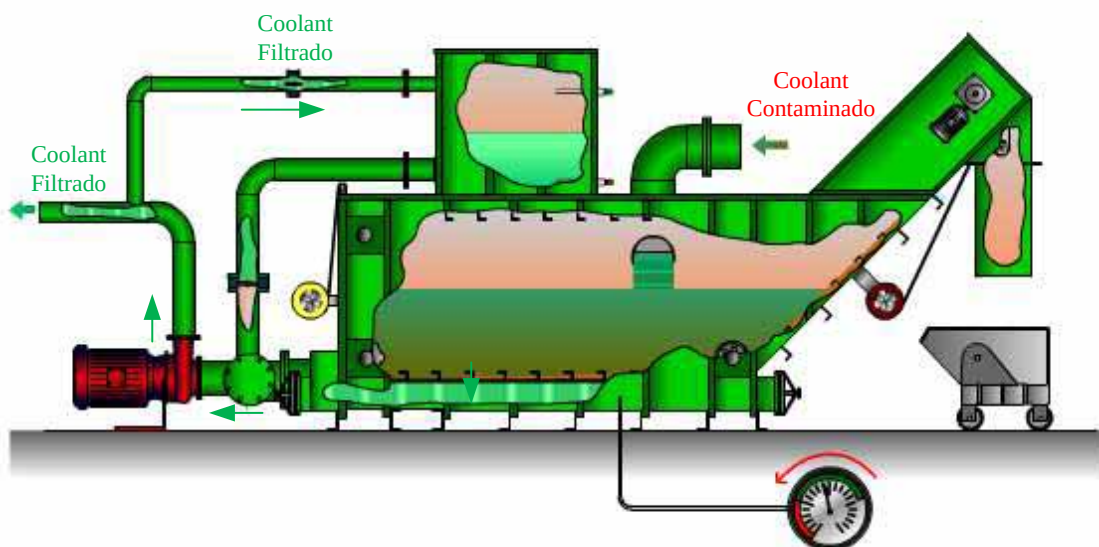


Fonte: Adaptado de (AFC BARNES, SDP)

1) Filtragem

O coolant contaminado é forçado por sucção a atravessar o elemento filtrante, manta de tecido não tecido, no fundo do tanque sujo por meio de bomba á jusante da mídia. Esta filtragem alimenta o tanque limpo que se encontra na parte de cima ate certo nível e as máquinas constantemente. A pressão vai reduzindo, devido resistência da torta, até se ter uma pressão negativa próxima a 0.34 bar (na maioria dos casos) conforme figura 37.

Figura 37 - Etapa de filtragem de um sistema a vácuo

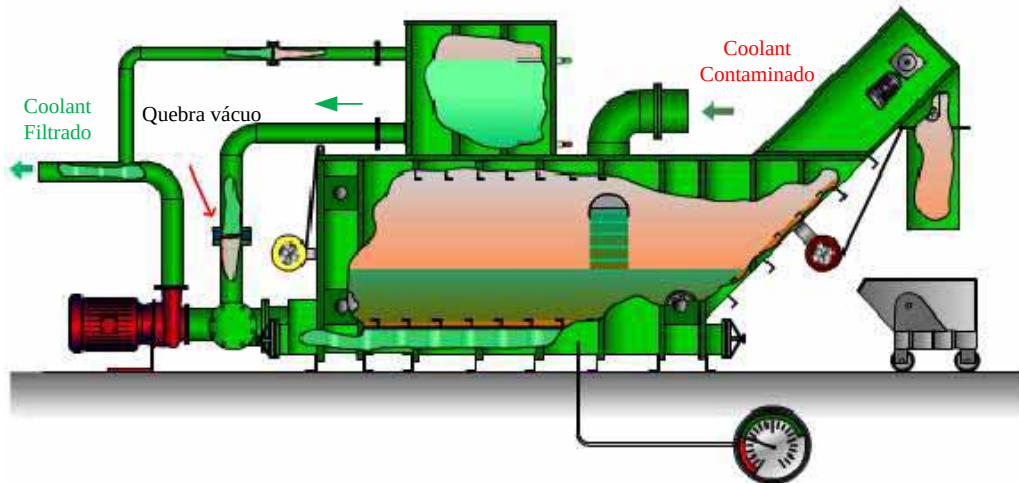


Fonte: Adaptado de (AFC BARNES, SDP)

2) Quebra do vácuo

Após atingido a pressão máxima de vácuo é acionado um válvula de quebra de vácuo que libera o coolant acumulado no tanque limpo que alimentará as máquinas conforme mostrado na figura 38.

Figura 38 - Momento em que o vácuo é “quebrado” num sistema de filtragem a vácuo

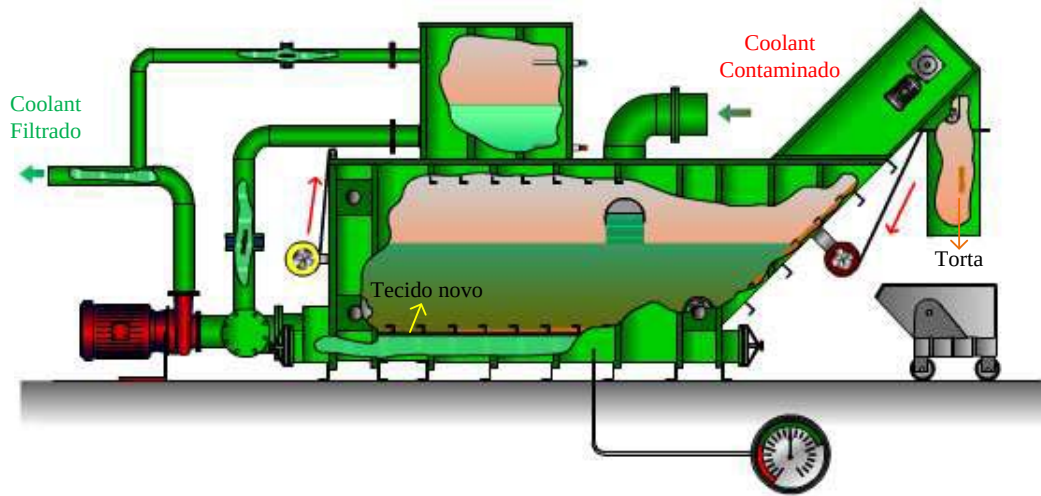


Fonte: Adaptado de (AFC BARNES, SDP)

3) Passe do elemento filtrante

Esta etapa corresponde ao fim do ciclo de filtragem a vácuo. Após o vácuo ter sido quebrado, a pressão sobre a mídia filtrante é reduzido, pois não ocorre passagem de fluido através desta, e o rolo de tecido filtrante dá um “passe” por meio de esteiras alimentando a área de filtragem com tecido novo e limpo e consequentemente expulsando torta acumulada na manta no fim do curso. Após esse passe a válvula de quebra vácuo se fecha novamente e a filtragem volta a ocorrer no tanque sujo iniciando um novo ciclo. Tal etapa é mostrado na figura 39.

Figura 39 - Passe do elemento filtrante de um sistema de filtragem a vácuo



Fonte: Adaptado de (AFC BARNES, SDP)

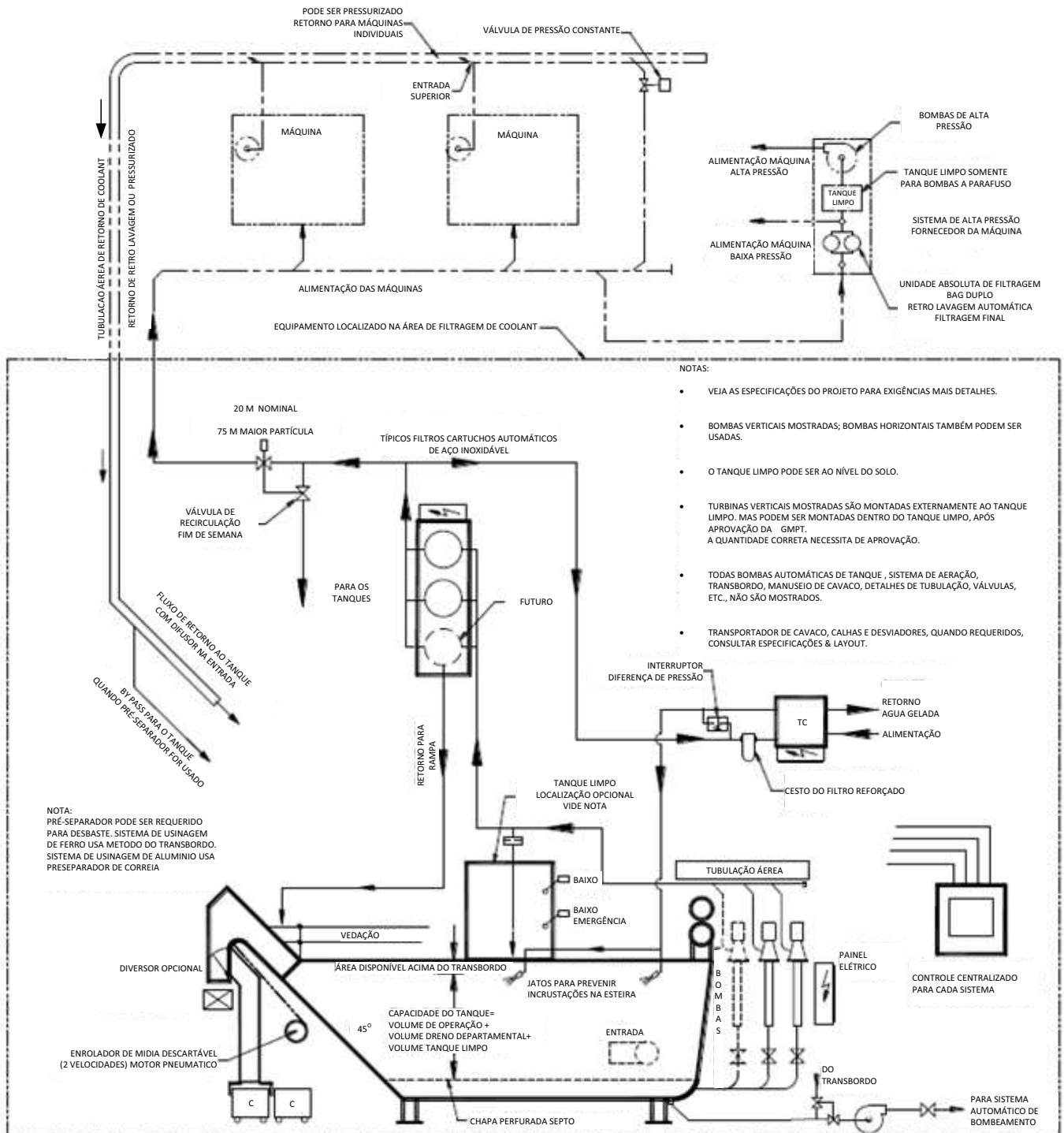
Estas figuras correspondem a uma representação esquemática resumida do princípio de funcionamento de um sistema de filtragem a vácuo. Diversos outros componentes existentes num sistema reais estão omitidos. Um exemplo de um esquema real de filtragem é mostrado na figura 40, tal sistema é o modelo padrão adotado como referencial de projeto de sistemas de filtragem a vácuo com mídia descartável.

Da figura 40 é possível notar que após o coolant filtrado deixar o sistema principal de filtragem a vácuo, o fluido passa por uma filtragem secundária num filtro do tipo cartucho. Essa filtragem é mais fina e sensível, realizada para garantir a micragem do coolant que vai para as máquinas. Uma parcela do filtro após a filtragem secundária é enviada a um trocador de calor que resfria o coolant e o retorna ao tanque sujo sobre a esteira por meio de jatos para evitar ressecamento do tecido e melhorar a capacidade de filtragem.

O tanque sujo é alimentado por um pré-separador, que consiste numa esteira de tela metálica que arrasta particulados maiores, constantemente, para fora do sistema.

Um sistema completo de filtragem desde o sistema primária de filtragem, passagem pelo secundária, daí ate as máquinas e posteriormente retornando ao sistema de filtragem é mostrado na figura 40.

Figura 40 - Esquema do modelo sistema de filtragem a vácuo com mídia descartável com sistema secundário de filtragem de aço inoxidável



Fonte: Adaptado de (MANN-HUMMEL, SDP)

3.20 FILTROS CARTUCHO DE AÇO INOXIDÁVEL

Conhecidos comumente como filtros cartridge, cartucho em inglês, possuem um peculiaridade em que a membrana do elemento filtrante é de aço inoxidável com poros do tamanho que variam de 2 μm até 100 μm e assim são usados muitas vezes como filtros secundários.

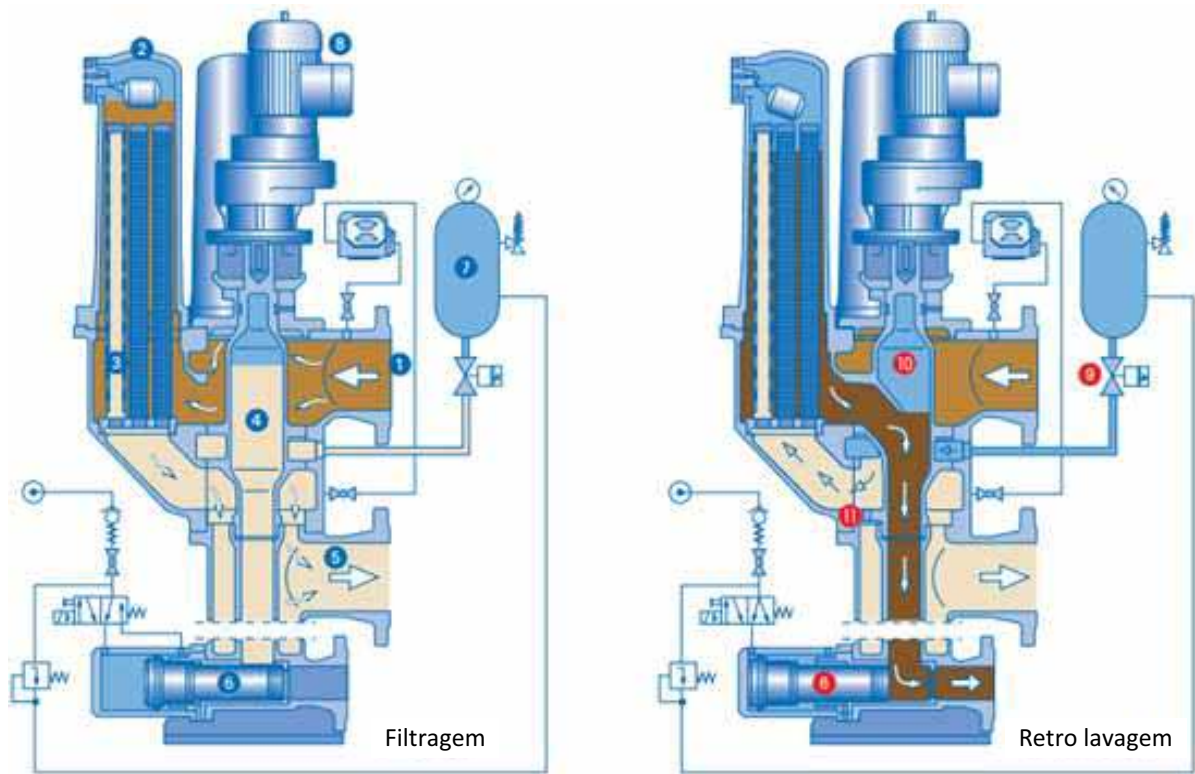
As características essenciais de um filtro de cartucho inclui um alojamento cilíndrico, geralmente pressurizado para suportar a pressão no fluido a ser filtrado (mas a operação de vácuo não está excluída), em que fica um elemento de filtro substituível, que é o cartucho podendo ser feito de diferentes materiais além de aço inoxidável nas formas cilíndricas e em comprimentos e diâmetros padronizados. No interior dos cartuchos existem as velas filtrantes, conforme figura 44, em numero que varia de 7 a 21 dependendo do tamanho do invólucro.

São mais comum os filtros onde possuem apenas um cartucho por invólucro, e em caso de altas vazões, utilizar cartuchos em paralelo. A esta configuração denomina-se Sistema Duplex onde o fluido atravessa os cartuchos enquanto um fica em estado de stand-by. Este cartucho deixa o estado de stand-by no momento em que uma determinada diferença de pressão atua sobre o cartucho em uso e este deve ser limpo, na maioria das vezes de forma automática por um contra fluxo (retro lavagem).

3.20.1 Filtros automáticos com retro lavagem (Automatic Back-flushing filter)

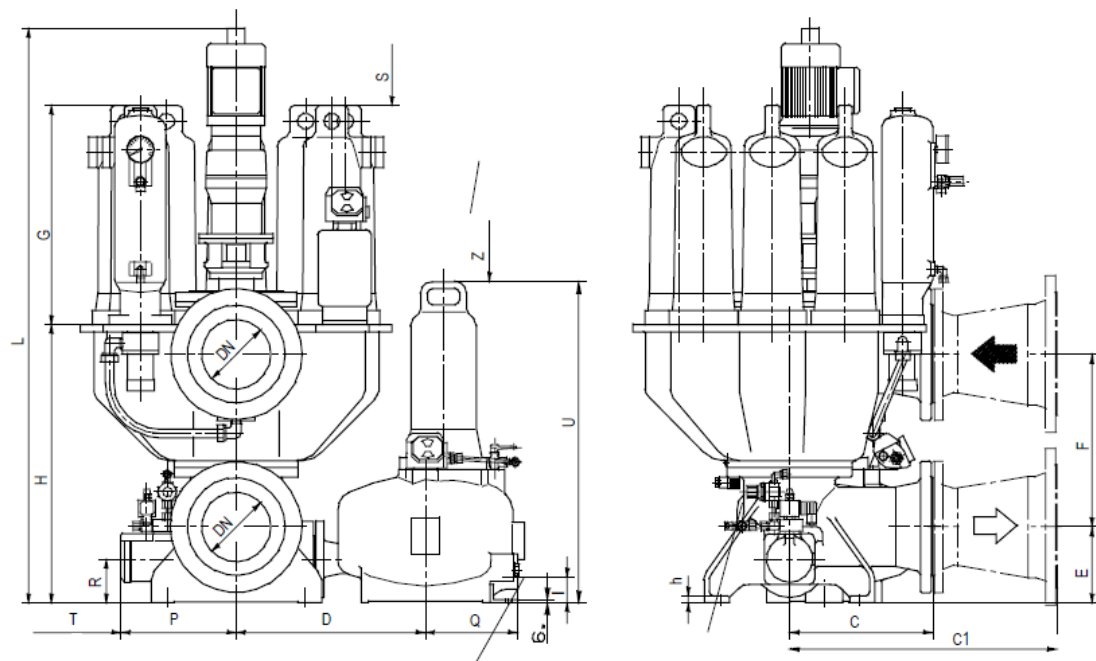
Como citado anteriormente, alguns filtros cartuchos possuem a função de retro lavagem. A forma mais comum de limpeza é inverter o fluxo de fluido através do elemento filtrante, e assim soprar a superfície limpa de contaminantes recolhidos. Uma vez que esta ação requer que a filtração pare, alguns filtros realizam a retro lavagem de forma automática tendo sempre um conjunto de cartucho em stand-by durante filtragem. Quando o nível de pressão máximo for atingido, estes cartuchos em stand-by são ativados e os demais são limpos, um sistema de rodízio. A figura 41 mostra o principio básico de funcionamento de um filtro da fabricante Boll & Kirch. A figura 42 ilustra o formato do filtro Boll & Kirch, cujo modelo é *Type 6.61- Automatic back-flushing*, usado no estudo de caso. A figura 43 ilustra diferentes cartuchos de diferentes modelos, estes cartuchos que alojam as velas (elemento filtrante), conforme mostrado na figura 44.

Figura 41 - Princípio básico de funcionamento de um filtro de cartucho da fabricante Boll & Kirch



Fonte: Adaptado de (BOLL & KIRCH, SDP)

Figura 42 - Esquema de um modelo (Automatic back-flushing tipo 6.61) de filtro de cartucho da marca Boll&Kirch utilizado na planta da General Motors



Fonte: (BOLL & KIRCH, SDP)

Figura 43 – Exemplo de diferentes modelos de cartuchos Boll & Kirch



Fonte: (BOLL & KIRCH, SDP)

Figura 44 - Modelo de uma vela utilizada no filtro tipo 6.61 (GM-SJC¹⁸)



Fonte: Autor

¹⁸ Fábrica de Powertrain da General Motors em São Jose dos Campos, 2014.

4 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso deste trabalho tem como intenção mostrar a substituição de um elemento filtrante de um sistema de filtração de coolant à vácuo com mídia descartável e filtração secundária a fim de redução de custo. O sistema analisado situa-se na fábrica de transmissões da General Motors em São José dos Campos, São Paulo.

4.1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de filtração de coolant são sistemas enormes e robustos, uma vez instalados exigem baixa manutenção, porém os sistemas que possuem mídia descartável necessitam da reposição da manta filtrante frequente, representando um custo operacional que dependendo da demanda de vazão filtrada será alto. Além da reposição de mídia ocorre também reposição de água evaporada do sistema e coolant a fim de manter a proporção de emulsão, além das manutenções preventivas mecânicas e elétricas comuns de máquinas industriais.

Para o estudo de caso será analisado a qualidade de filtração do sistema atual e proposto e se este atenderá as especificações do processo. A análise da qualidade do coolant se dá por meio de teste de medição de quantidade de partículas de determinados tamanhos.

4.1.1 Sistema principal de filtração

O sistema principal de filtração é do tipo à vácuo com mídia removível conforme mostrado na figura 45. Os dados relevantes deste sistema são:

- Fabricante: Mann-Hummel;
- Modelo: Hydro-Vac HV-180-HW
- Vazão nominal: 11.300 l/min

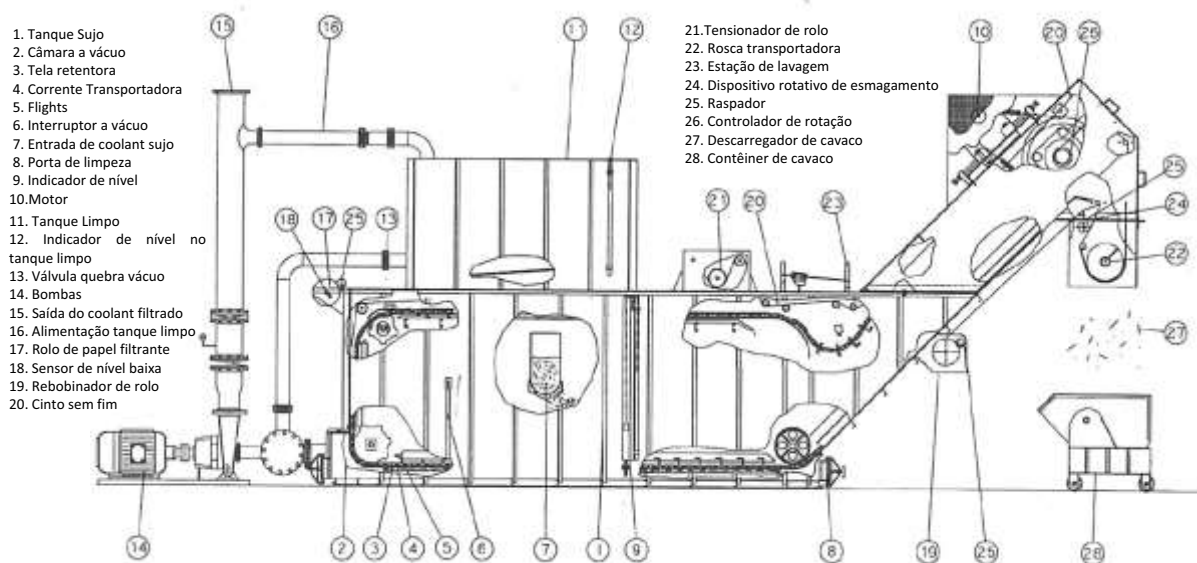
A figura 46 ilustra os diferentes componentes existentes no sistema de filtração em estudo.

Figura 45 - Sistema de filtragem à vácuo com mídia descartável (GM-SJC)



Fonte: Autor.

Figura 46 - Esquema representativo do sistema de filtragem à vácuo HV-180-HW da Mann-Hummel



Fonte: Adaptado de (MANN-HUMMEL, SDP)

4.1.2 Sistema secundário de filtragem

O sistema secundário é composto de filtros cartuchos de aço inoxidável conforme mostrado na figura 47. Este sistema garantirá uma filtragem mais fina requerida pelas máquinas de usinagem. Os dados relevantes do sistema são:

- Fabricante: Boll & Kirch;
- Modelo: Type 6.61.GR10 DN 100- Automatic back-flushing;
- Escala nominal de filtração: 30 μm ;
- Temperatura de trabalho: 80°C;
- Pressão de entrada/ saída: 7 bar / 4 bar;
- ΔP retro lavagem: 3 bar;
- Volume interno: 67 litros.

Figura 47 - Foto de um sistema de filtração do tipo Cartucho com mídia de aço inoxidável (GM-SJC)



Fonte: Autor.

4.1.3 Processo de usinagem

Este sistema de filtração de coolant suporta um processo de usinagem de dois componentes Powertrain:

- Componentes usinados: Placa do Rolamento e Carcaça da Transmissão;
- Material dos componentes: Alumínio;
- Takt-time de usinagem: 129 peças / hora.

Figura 48 - Placa de rolamento (esq) e carcaça da transmissão (dir). Componentes usinados (GM-SJC)



Fonte: Autor.

4.1.4 Fluido de corte (Coolant)

- Fabricante: Tirreno;
- Modelo: Greencool 3100 BF;
- Faixa de trabalho: 9-10 % H_2O ;
- Capacidade tanque: 65.000 litros.
- Características: Quando diluído forma uma emulsão semi-leitosa, mas durante o uso com a entrada dos contaminantes a emulsão fica bem leitosa e totalmente opaca. O produto possui uma boa detergência e não forma resíduos que poderiam obstruir precocemente os poros da manta fazendo com que gastasse mais filtro manta.

A figura 49 ilustra a aparência do coolant em estudo.

Figura 49 - Tampa do tanque sujo com visualização do coolant (GM-SJC)



Fonte: Autor.

4.2 DADOS ATUAIS

4.2.1 Elemento filtrante #1

- Fabricante: Interfiltra
- Modelo: Tecido não tecido
- Preço: R\$ 961,93 un.
- Dimensão: 100 m x 1,85 m
- Consumo de rolo: 1 rolo / 60 horas de operação
- Especificações técnicas: Composição: 100% Poliéster, agulhado;
Gramatura: 200 g/m²;

A figura 50 mostra a aparência deste meio filtrante.

Figura 50 - Amostra do tecido #1 (GM-SJC)



Fonte: Autor.

4.2.2 Teste de contagem de partículas #1

De forma a mensurar a capacidade de filtragem do sistema atual e comparar com uma possível proposta de mudança, realizou-se testes de contagem de partícula. Os testes de partículas mostrados neste trabalho são de autoria do laboratório TRIBOLAB-SP. Os testes no laboratório seguem as normas para contagem de partículas: ISO 4406 e NAS 1638 (corpos de prova conforme ISO 4407, ARP 598 ou NAS 1638).

As amostras foram coletadas em dois pontos do filtro, no tanque sujo (antes da filtragem) e no tanque limpo (após filtragem). Os resultados representam a quantidade de partículas existentes nos pontos de coleta e são mostrados na tabela 10:

Tabela 10 - Dados do teste de contagem de partículas no sistema #1

Dados do teste de contagem de partículas #1		
Data da coleta	21/10/2014	21/10/2014
Ponto de coleta	Tanque Sujo	Tanque Limpo
Contagem de partículas	SDPC*	ISO 19/15 NAS 11*

Fonte: (TRIBOLAB, 2014)

* SDPC = Sujo Demais Para Contar (classe máxima da norma) foi atingida no final da contagem. Essa amostra apresenta nível de partículas que impede a realização do ensaio solicitado. Ou seja, a membrana apresenta particulado assemelhado a cavacos (partículas de até 7 mm).

* ISO 4406 19/15 NAS 11(Cont. de partículas/ml): $\geq 5\mu\text{m}$: 3926.98; $\geq 10\mu\text{m}$: 764.31; $\geq 15\mu\text{m}$: 260.92; $\geq 25\mu\text{m}$: 55.35; $\geq 50\mu\text{m}$: 7.91; $\geq 100\mu\text{m}$: 0.06.

Maior partícula: escura com 750 μm .

4.3 NOVA CONFIGURAÇÃO

A nova configuração proposta trata-se da substituição do elemento filtrante da *Interfiltra* por uma mídia da fabricante *Ober* de menor custo e mesma proposta funcional.

4.3.1 Elemento filtrante #2

- Fabricante: Ober Indústria e Comércio S/A
- Modelo: N.T.100% PES /L. 1,85 / GR 115 - RESINADO
- Preço: R\$ 795,00 un.
- Dimensão: 100 m x 1,60 m
- Consumo de rolo: 1 rolo / 60 horas de operação
- Especificações técnicas:
 - Composição: 100% Poliéster, resinado;
 - Gramatura: 115 g/m²;

4.3.2 Teste de contagem de partículas #2

Os testes realizados no laboratório da TRIBOLAB-SP seguiram as normas para contagem de partículas: ISO 4406 e NAS 1638 (corpos de prova conforme ISO 4407, ARP 598 ou NAS 1638).

As amostras foram coletados em dois pontos do filtro, no tanque sujo (antes da filtração) e no tanque limpo (após filtração). Os resultados são mostrados na tabela 11:

Tabela 11 - Dados do teste de contagem de partículas no sistema #2

Dados do teste de contagem de partículas #2		
Data da coleta	23/10/2014	23/10/2014
Ponto de coleta	Tanque Sujo	Tanque Limpo
Contagem de partículas	SDPC*	ISO 20/16 NAS 12*

Fonte: (TRIBOLAB, 2014)

* SDPC = Sujo Demais Para Contar (classe máxima da norma) foi atingida no final da contagem. Essa amostra apresenta nível de partículas que impede a realização do ensaio solicitado. Ou seja, a membrana apresenta particulado assemelhado a cavacos (partículas de até 7 mm).

* ISO 4406 20/16 NAS 12 (Cont. de partículas/ml): $\geq 5\mu\text{m}$: 6562.54; $\geq 10\mu\text{m}$: 1314.49; $\geq 15\mu\text{m}$: 378.86; $\geq 25\mu\text{m}$: 62.59; $\geq 50\mu\text{m}$: 3.29; $\geq 100\mu\text{m}$: 0.12.

Maior partícula: escura com 300 μm .

Figura 51 - Amostra do tecido #2 (GM-SJC)

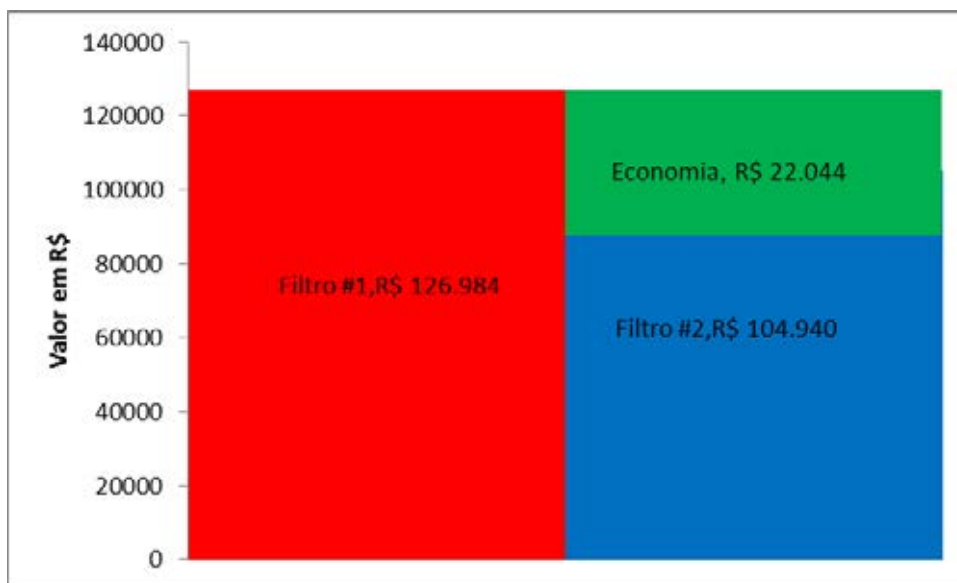


Fonte: Autor.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para discussão dos resultados, mostremos inicialmente a comparação de custo anual dos dois elementos filtrantes considerando o mesmo consumo das mantas filtrantes para um ano com 330 dias de trabalho a cada troca ocorrendo a cada 60 horas de trabalho.

Figura 52 - Economia anual de Manta Filtrante.



Fonte: Autor.

Da figura 52 observa-se uma economia de R\$ 22.044 por ano. Quantia significativa se pensarmos que na fábrica em estudo existe cerca de 10 sistemas iguais a esse, resultando numa economia anual de R\$ 220.440, o que sustenta o estudo de caso.

Entretanto, devemos analisar se o filtro #2 atende às especificações do processo e se haverá incremento de outro custo operacional. Assim devemos comparar o teste de contagem de partículas entre as duas mantas filtrantes.

Da tabela 12, comparação do número de partículas no tanque limpo, podemos observar que o elemento filtrante #2 possui uma classe de limpeza “pior” que o elemento #1, segundo normas ISO 4406 e NAS 1638. Tal mudança de desempenho é evidente ao compararmos as quantidades de partículas até 25 μm e $\geq 100 \mu\text{m}$, em número maior no filtro #2.

Tabela 12- Comparação dos testes de contagem de partículas #1 e #2

Comparação dos testes de contagem de partículas								
n°/ml	≥5 µm	≥10 µm	≥15 µm	≥25 µm	≥50 µm	≥100 µm	Maior partícula µm	ISO NAS
#1	3926,98	764,31	260,92	55,35	7,91	0,06	750	19/15 11
#2	6562,54	1314,49	378,86	62,59	3,29	0,12	300	20/16 12

Fonte: Autor.

No entanto, a partir deste ponto, o filtro #2 passar a conter menos partículas, caso para $\geq 50 \mu\text{m}$ e $\geq 100 \mu\text{m}$. Além de a maior partícula medida ser menor do que no filtro #1. Para partículas $\geq 50 \mu\text{m}$ e até $100 \mu\text{m}$ o filtro #2 apresentou menos partículas que o filtro #1, tal resultado pode ser ignorado e tido como erro experimental causado por locais diferentes que a coleta das amostras foram realizadas.

Assim, a primeira vista podemos julgar que o filtro #2 não desempenha o mesmo papel funcional do que o filtro #1 e a troca não é recomendada mesmo com a economia no custo de operação. O fato da manta #2 não reter tantas partículas menores como a manta #1 pode ser porque sua gramatura é quase a metade quando comparada a manta #1.

A troca da manta filtrante não é recomendada pelos motivos que se seguem:

- O fato de mais partículas finas passarem pelo primeiro estágio de filtragem é que estas sobrecarregarão o sistema secundário de filtragem.
- O sistema secundário de filtragem existente na planta são filtros cartuchos muito sensíveis e que requerem uma manutenção preventiva uma vez ao ano. Esta manutenção seria mais frequente e o custo, somando todos os 20 filtros cartuchos que atendem as máquinas de usinagem do processo estudado, seria impraticável. Cada cartucho é composto de sete até 21 velas, sendo que o custo de cada vela varia de R\$ 300,00 a R\$ 500,00 dependendo do tamanho. Com partículas mais finas sendo filtradas, espera-se que a vida útil, apesar de longa, diminua e a troca de algumas velas representaria um custo adicional.

- Além dos filtros cartuchos sofrerem um maior desgaste, estes são os responsáveis por garantir que nenhuma partícula “grande” (≥ 1 mm) adentre nas máquinas e ferramentas de corte e danifique ou afete a qualidade do produto final. O prejuízo, caso um lote de peças e/ou ferramentas for danificado, superaria em muita a economia da troca do elemento filtrante inicialmente proposto. O valor do prejuízo é difícil de mensurar em virtude da alta produção diária de produtos usinados sendo em torno 2300 componentes por dia.

Analisando os dados de contagem de partículas e as especificações globais da General Motors (tabela 8 e 9) quanto ao nível de contaminação do coolant nenhum dos dois sistemas consegue atender as exigências do ponto de vista que a maior partícula descoberta no tanque limpo do sistema nas duas configurações de elemento filtrante supera os 70 μm sugeridos.

6 CONCLUSÃO

O estudo de caso para analisar se uma troca do elemento filtrante, inicialmente com a proposta de ter um custo operacional menor para fábrica, mostrou-se incapaz de atender as necessidades do processo de usinagem. A economia na compra de um produto mais barato não compensaria o aumento nos custos de manutenção de todos os filtros cartuchos (filtração secundária) além de correr o risco de danificar peças e ferramentas valiosas.

A forma como os testes foram realizados para medição da qualidade do coolant por meio da contagem de partículas não condiz com o padrão exigido pela companhia. Foi mostrado que a empresa exige um padrão de limpeza em mg/l e os testes segundo normas internacionais são em número de partículas/ml, sendo assim, difícil a análise da qualidade do sistema de filtração a vácuo. No entanto, durante a realização deste trabalho diversos departamentos relataram que o sistema de filtração satisfaz às necessidades do processo, mas que diversos parâmetros podem ser melhorados, tais como, a regulação do vácuo formado na filtração e o tempo de passe do filtro.

O estudo mostrou o quanto estes sistemas de filtração são importantes para ambientes fabris e que muito dinheiro é gasto, desde a etapa de seleção do tipo de sistema que será usado até a instalação destes de forma que se tenha um sistema eficiente e robusto por muitos anos. Por serem sistemas muitas vezes enormes e gerarem resíduos, estes se localizam nas áreas mais afastadas e próximas da saída da fábrica e, uma vez instalados, são geralmente negligenciados pela maioria sem conhecimento de sua complexidade, tecnologia e oportunidades de melhoria existentes. Trabalhos como este se divulgado para outros departamentos da fábrica exporia todo o conteúdo e a importância dos sistemas de filtração para o funcionamento da linha de produção de usinagem. Todos saberiam das deficiências e necessidades de melhoria dos sistemas, sendo os estudos de caso para redução de custo e aumento da lucratividade da companhia mais frequentes.

REFERÊNCIAS

AFC BARNES. **Vacuum filters**. Advanced Filtration Concepts. Disponível em: < <http://afcbarnes.com/>>. Acesso em: 06 jul. 2014.

BARNES INTERNATIONAL. **Rotary drum filters**. Disponível em: < <http://barnesintl.com/>>. Acesso em 06 jul. 2014.

BOLL & KIRCH. **Process-lubricant**. Disponível em: < <http://www.bollfilter.com/>>. Acesso em: 09 set. 2014.

CHEREMISINOFF, N. P. **Liquid filtration**. Woburn: Butterworth-Heinemann, 1998. 327p.

FILTRA SYSTEMS. **Industries: CNC machine tool coolant filtration systems**. Disponível em: < <http://www.filtrasystems.com>>. Acesso em: 06 jul. 2014.

GENERAL MOTORS. **Global machinery and equipment specification document: regional coolant filtration systems**. 3rd ed. Detroit: Global GM Manufacturing Engineering CETC, 2014. 70p.

HYDAC INTERNATIONAL, **Filtration handbook**. Disponível em: <<http://www.hydac.com>>. Acesso em: 06 jul. 2014

MANN-HUMMEL. **Technical data: filtersystem emulsion hydro-vac HV-180-HW for transmission case and bearing plate**. São Paulo, 2006.

PARKER, **Guide to contamination standards**. Disponível em: <<http://www.parker.com>>. Acesso em: 06 out. 2014.

RAKIĆ, R; RAKIĆ, Z. The influence of the metal working fluids on machine tool failures. **Wear**, Lausanne, v.252, n. 5-6, p. 438-444, 2002. Disponível em:< <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164801008900>>. Acesso em 31 jul. 2014.

RUSHTON, A.; WARD, A. S.; HOLDICH, R. G. **Solid-liquid filtration and feperation fechnology**. New York: VCH Publishers, 1996. 551 p.

SUTHERLAND, K. **Filter and filtration handbook**. 5th ed. Burlington: Elsevier, 2008. 536 p.

SUTHERLAND, K; PURCHAS, D. B. **Handbook of filter media**. 2nd ed. Burlington: Elsevier, 2002. 553 p.

TIEN, C.; RAMARAO, B.V. **Granular filtration of aerosols and hydrosols**. 2nd ed. New York: Elsevier, 2007. 522 p.

TRIBOLAB. **Relatório de exame nr. 1410 – 2230/2231**. São Paulo: Quím. Marcia T. F. Zampieri. 2014, 4 p.

UNICAMP. **Disciplina Operações unitárias I: Filtração**. Campinas, 2012. Disponível em: <http://www.unicamp.br/fea/ortega/aulas/aula19_Filtracao.ppt>. Acesso em: 11 abr. 2014

WAGNER, J. **Membrane filtration handbook practical tips and hints**, 2nd ed. Malaysia: Osmonics, 2001. 129 p.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

A BRIGHTER future? filtration and grey water recycling. **Filtration + Separation**. Apr. 2008. Disponível em: <<http://www.filsep.com>>. Acesso em: 01 jul 2014.

AMERICAN FILTRATION & SEPARATION SOCIETY. Disponível em: < <http://www.afssociety.org/articles>>. Acesso em: 05 jun. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE FILTROS E SEUS SISTEMAS AUTOMOTIVOS E INDÚSTRIAS. Disponível em: <<http://www.abrafiltros.org.br/>>. Acesso em: 05 jun. 2014.

CIMMCOOL FLUID TECHNOLOGY. **Technical Report: central filtration systems for metalworking fluids**. Cincinnati: Milacron Marketing LLC Technical Report No. J/N 96/41. 8 p. Disponível em: < <http://www.cimcool.com/product-information-msds-sheets/technical-reports/>>. Acesso em 26 jul. 2014.

Universidade Federal Santa Catarina. **Filtração**. Florianópolis: Departamento de Eng. Química e de Eng. de Alimentos. 17 p. Disponível em :<<http://www.enq.ufsc.br/disci/eqa5313/>>. Acesso em 09 jul. 2014.

FOX, R W.; MCDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 1998. 662 p.

GENERAL MOTORS. **Global machinery and equipment specification document: single machine coolant filtration systems**. 3rd ed. Detroit: Global GM Manufacturing Engineering CETC, 2014. 70 p.

JORNITZ, M. W.; MELTZER, T. H. **Filtration and Purification in the Biopharmaceutical Industry**. 2nd ed. New York: Informa Healthcare. 804 p.

MANG, E. **Encyclopedia of Lubricants and Lubrication**. Weinheim: Springer, 2014. v.1.

OBERG, E.; JONES, F. D.; HORTON, H. L.; RYFFEL, H. H. **Machinery's handbook**. 26. ed. New York: Industrial Press, 2012. 3915 p.

OLIVEIRA, Marcos Gomes. **Manual da filtração industrial**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2013. 272 p.

PATERNIANI, J. E. S.; CONCEIÇÃO, C. H. Z. **Eficiência da pré-filtração e filtração lenta no tratamento de água para pequenas comunidades**. Espírito Santo do Pinhal. 2004. 8 p. Disponível em: < <http://ferramentas.unipinhal.edu.br/ojs/engenhariaambiental/viewarticle.php?id=7>>. Acesso em 19 jul. 2014.

RAHÄUSER, R.; KLEMM, P.; VERL, A.; KIRCHER, C. **Increasing the energy efficiency in metal cutting manufacturing trough a demand based coolant filtration**. Stuttgart: 20th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, 2013. 2 p. Disponível em :< http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-981-4451-48-2_38#page-1>. Acesso em 21 maio 2014.

REVISTA MEIO FILTRANTE. Disponível em: < <http://www.meiofiltrante.com.br/>>. Acesso em: 05 jun. 2014.

SILVA, M. R.; FREITAS, R. F.; SILVEIRA, R. B. **Operações unitárias: filtração**. Bento Gonçalves: Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, 2012. 29 p.