OSNY FERREIRA DE CAMARGO

**ESTUDO DE DESEMPENHO DE FILTROS PARA PARTICULADOS
E SELEÇÃO DE RESPIRADORES PARA USO EM MINERADORAS**

OSNY FERREIRA DE CAMARGO

**ESTUDO DE DESEMPENHO DE FILTROS PARA PARTICULADOS
E SELEÇÃO DE RESPIRADORES PARA USO EM MINERADORAS**

Texto apresentado à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para o
Exame de Dissertação para a obtenção
do título de Mestre em Engenharia

São Paulo
2007

OSNY FERREIRA DE CAMARGO

**ESTUDO DE DESEMPENHO DE FILTROS PARA PARTICULADOS
E SELEÇÃO DE RESPIRADORES PARA USO EM MINERADORAS**

Texto apresentado à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para o
Exame de Dissertação para a obtenção
do título de Mestre em Engenharia

Área de concentração:
Engenharia Mineral

Orientador:
Professor Doutor
Wilson Siguemasa Iramina

São Paulo
2007

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 11 de agosto de 2007.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Camargo, Osny Ferreira de

Estudo de desempenho de filtros para particulados e seleção de respiradores para uso em mineradoras / O.F. de Camargo. -- ed.rev. -- São Paulo, 2007.

100 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

1.Segurança em mineração 2.Respiração 3.Equipamento de proteção individual (Estudo comparativo) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II.t.

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho à memória de meu pai, que me ensinou ser a educação o valor que difere o homem de outras espécies animais; a minha mãe, pela forma carinhosa e especial como sempre me apoiou e torceu pelo meu sucesso; e as minhas filhas, para que se inspirem em minha atitude e adotem a educação e a busca do conhecimento como um valor eterno.

AGRADECIMENTOS

Aos amigos que me apoiaram e me incentivam nos momentos difíceis, e não me deixaram desistir por falta de tempo ou inspiração. Entre eles, destaco: Gláucia Gabas e Antonio Vladimir Vieira.

Ao meu orientador, Wilson Siguemasa Iramina e a Ivo Torres de Almeida, por terem acreditado na possibilidade de desenvolvimento do tema proposto durante a fase de qualificação.

Ao diretor técnico da 3M Company, em Saint Paul, Estados Unidos, Michael L. Runge por ter liberado o acesso a informações de arquivos internos, relativas a resultados de testes comparativos entre diferentes modelos e unidades de equipamentos de testes de respiradores.

Ao grande amigo Kenneth L. Simpson, do laboratório corporativo de qualidade assegurada para respiradores da 3M Company, pelo envio das informações, e por tudo que tenho aprendido com ele, em quase 20 anos de trabalho conjunto.

Ao Graham Bostock do laboratório da 3M em Aycliffe, Inglaterra pelas informações sobre o estudo europeu e desenvolvimento de normas naquele continente.

Ao amigo, companheiro e mentor Paul E. Olson, também da 3M em Saint Paul, pelo aprendizado que tive sobre proteção respiratória e, nesse trabalho, pela revisão do resumo na língua inglesa.

A Isabel Cristina, pelo trabalho de revisão da Língua Portuguesa.

E, finalmente, a Maurício Torloni, professor, amigo, mentor e inspirador de todos que se dedicam ao estudo da proteção respiratória.

RESUMO

A proteção respiratória é largamente utilizada como medida de controle da exposição dos trabalhadores a particulados em suspensão no ar ambiente de trabalho em mineração. A composição química desses particulados influi nos efeitos sobre a saúde dos trabalhadores expostos e também pode afetar o desempenho do material filtrante dos respiradores. Materiais particulados oleosos suspensos no ar encontrados em ambientes de mineração podem afetar desfavoravelmente as cargas eletrostáticas comumente adicionadas às fibras dos filtros para particulados. Por essa razão os testes de laboratório dos filtros procuram simular algumas condições desfavoráveis encontradas nos ambientes de trabalho e incluem nos procedimentos de testes ensaios com substâncias oleosas como o óleo de parafina ou o óleo de DOP. Os particulados não oleosos são representados nos ensaios por partículas de cloreto de sódio. O objetivo desta dissertação é comparar três métodos de ensaios para aprovação de filtros para particulados utilizados em respiradores purificadores de ar não motorizados e relacionar as condições de ensaios com as condições onde os filtros são usados em trabalhos de minerações. Para chegar a esse objetivo foram realizadas pesquisas bibliográficas sobre os riscos da exposição a particulados na indústria mineral, o uso de equipamentos de proteção respiratória e mecanismos usados para filtração de particulados; estudados os métodos de teste descritos em três normas (EN 143 europeia, 42 CFR 84 norte americana e NBR 13697 brasileira), comparados os princípios de funcionamento dos equipamentos de testes Moore's e TSI 8110/8130, e analisados resultados de estudos comparativos realizados com esses equipamentos. Conclui que os métodos de testes de desempenho submetem os filtros a condições bem mais agressivas que aquelas encontradas na maioria das condições de trabalho de mineração; que os métodos de testes europeus e norte-americanos submetem os filtros a condições semelhantes, enquanto o método brasileiro é mais brando, uma vez que não requer que a eficiência do filtro seja medida durante e após a deposição de quantidades definidas de aerossol de teste; que equipamentos de testes mais modernos que os utilizados para aprovação de filtros no Brasil incorporam progressos tecnológicos que permitem melhor repetitividade de resultados; que resultados de estudos

comparativos realizados entre laboratórios mostram boa correlação entre as medições da eficiência obtidas por equipamentos Moore's utilizados na comunidade europeia e Brasil, TSI 8110 e TSI 8130, este último utilizado pelo NIOSH nos EUA.

Palavras-chave: segurança em mineração, respiração, equipamentos de proteção (estudo comparativo)

ABSTRACT

Respiratory protection is widely used in mining operations in order to control the worker's exposure to airborne particulates present in the workplaces. Chemical composition of these particulates impacts on the worker's health and can also affect the respirator filter media. Oily aerosols found in mining environments affect the electrostatic filter media with enhanced performance over mechanical filters. Therefore, filters laboratory tests include oily substances such as paraffin oil and DOP (Di-octyl phthalate) in the test procedures, simulating some workplace unfavorable conditions. Non-oily particulates are represented by sodium chloride particles. This dissertation compares the test methods described in following standards: the European standard EN 143, the document 42 CFR 84 adopted by NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) in United States of America (USA), and the Brazilian ABNT NBR 13697 adopted by Ministry of Labor of Brazil (MTE) and Fundação Jorge Duprat de Figueiredo (Fundacentro). This dissertation also compares the test methods conditions with the environmental conditions likely found in mineral industry. The applied methodology includes a bibliographic research about workplace environmental risk in mining industry, the use of respiratory protective devices and particulate filters technology. Also includes a study of the three test methods (EN 143, 42CFR 84 and NBR 13697), principles of Moore's and TSI 8110/8130 test instruments and analysis of inter-laboratory test studies made in Europe and USA. The conclusion shows that the test methods mentioned above subject the filters to conditions which are much more aggressive than the typical mining environments; that the European and USA test methods subject filters to comparable test conditions, while tests specified in Brazilian standards are more moderate compared to the European and North American, because filter loading is not required during the test; that new technologies incorporated in the test instruments improve repeatability and accuracy of test results; that comparison data obtained with many test instruments, made by various instrument makers allow one to conclude that there is good correlation between these instruments, in general and between the European's Moore's 4400 Tester Rig and the two TSI, AFT 8110 and AFT 8130, specifically.

Keywords: Mining safety, breathing, protective devices.

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 – Classificação dos equipamentos de proteção respiratória de acordo com a NBR 12543.....	15
Figura 4.2 – Respirador de linha de ar comprimido com capuz sendo utilizado em operação de carga de misturador.....	16
Figura 4.3 – Respirador semifacial com filtro para particulados da classe P2.....	17
Figura 4.4 – Respirador semifacial filtrante para particulados com filtro da classe P1 sendo utilizado em mineração.....	18
Figura 4.5 – Fotografia microscópica de um filtro de microfibras de polipropileno sem uso, com uma fibra em destaque.....	23
Figura 4.6 – Fotografia microscópica de um filtro de microfibras de polipropileno usado.....	23
Figura 4.7 – Representação gráfica do mecanismo de impactação inercial para captura de particulados pelos filtros.....	24
Figura 4.8 – Representação gráfica do mecanismo de interceptação para captura de particulados pelos filtros.....	24
Figura 4.9 – Representação gráfica do mecanismo de difusão browniana para captura de particulados pelos filtros.....	25
Figura 4.10 – Representação gráfica do mecanismo de força eletrostática para captura de particulados pelos filtros.....	25
Figura 4.11 – Variação de penetração com o diâmetro das partículas e da velocidade (V_0) do ar que as transporta	26
Figura 5.1 – Figura ilustrativa e gráfica mostrando curva de distribuição de tamanho de partículas utilizadas nos ensaios de cloreto de sódio das normas EN 143 e NBR 13697.....	44
Figura 6.1 – Relação do valor de penetração com diâmetro da partícula.....	49
Figura 6.2 – Relação entre Penetração e Desvio Padrão Geométrico.....	50
Figura 6.3 – Fotografia de um equipamento Bench Mounting Rig type 1100 (atual referência do equipamento Moore's).....	51
Figura 6.4 – Esquema de funcionamento do equipamento Moore's.....	52

Figura 6.5 – Nebulizador modelo “Collision” utilizado no equipamento Moore’s.....	53
Figura 6.6 – Fotografia de um equipamento TSI AFT 8130/8127.....	55
Figura 6.7 – Esquema de funcionamento do equipamento TSI 8130/8127.....	56
Figura 6.8 – Esquema de funcionamento do sistema de detecção do equipamento TSI 8130.....	57
Figura 6.9 – Representação gráfica dos valores de penetração de névoas de óleo em filtro de fibra de vidro apresentados por 10 laboratórios europeus.....	64
Figura 6.10 – Representação gráfica da variação de resultados de um laboratório comparado com a média de resultados obtidos por todos os laboratórios em cada faixa de penetração.....	66
Figura 6.11 – Representação gráfica dos valores de penetração de névoas de óleo normalizados em filtros perfurados.....	66
Figura 6.12 – Frasco de mistura de aerossol oleoso, conforme especificado na norma europeia EN 143 e NBR 13697.....	67
Figura 6.13 – Representação gráfica dos efeitos da diluição sobre os resultados de penetração.....	68
Figura 6.14 – Representação gráfica dos valores de coeficientes de variação do equipamento TSI 8110.....	69
Figura 6.15 - Modelos de equipamentos de testes participantes no programa de 2006.....	71
Figura 6.16 - Distribuição de equipamentos de teste por finalidade de uso.....	71
Figura 6.17 – Representação gráfica dos valores de penetração de aerossol de cloreto de sódio nos equipamentos da TSI, modelo 8110.....	76
Figura 6.18 – Representação gráfica dos valores de penetração aerossol de aerossol de cloreto de sódio nos equipamentos da TSI, modelo 8110, por faixa de penetração.....	77
Figura 6.19 – Representação gráfica dos valores de queda de pressão nos equipamentos da TSI, modelo 8110.....	78
Figura 6.20 – Representação gráfica dos valores de coeficientes de variação dos equipamentos TSI, modelo 8110, participantes do programa round robin 1992.....	79

Figura 6.21 – Representação gráfica dos valores de coeficientes de variação dos equipamentos Moore's, participantes do programa round robin 1992.....	80
Figura 6.22 – Representação gráfica percentagem de equipamentos TSI 8110 que apresentaram resultados fora do critério de controle, nos "round robins" 1989 a 1994.....	81
Figura 6.23 – Representação gráfica percentagem de equipamentos Moore's que apresentaram resultados fora do critério de controle, nos round robins 1989 a 1994.....	81
Figura 6.24 – Representação gráfica do número de equipamentos de testes que geram aerossol a partir de solução com 1% de NaCl, fora da faixa de controle em 2005 e 2006.....	82
Figura 6.25 – Representação gráfica do número de equipamentos de testes que geram aerossol a partir de solução com 2% de NaCl, fora da faixa de controle em 2005 e 2006.....	83
Figura 6.26 – Representação gráfica do número de equipamentos de testes que geram aerossol de DOP, fora da faixa de controle em 2005 e 2006.....	83
Figura 6.27 – Representação gráfica do número de equipamentos de testes que geram aerossol de óleo de parafina, fora da faixa de controle em 2005 e 2006.....	84
Figura 6.28 – Valores comparativos entre as percentagens de penetração inicial medidos no Moore's e no TSI 8110.....	85
Figura 6.29 – Valores comparativos entre as percentagens de penetração inicial medidos no Moore's e no TSI 8130.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Fatores de Proteção Atribuídos (FPA para respiradores).....	20
Tabela 5.1 – Classificação de filtros para particulados segundo a norma 42 CFR 84.....	34
Tabela 5.2 – Requisitos para aprovação de filtros para particulados de acordo com a norma europeia EN 143.....	37
Tabela 5.3 – Requisitos para aprovação de filtros para particulados de acordo com a norma europeia EN 149.....	37
Tabela 5.4 – Requisitos para aprovação de filtros para particulados de acordo com a norma europeia NBR 13697.....	41
Tabela 5.5 – Requisitos para aprovação de filtros para particulados de acordo com a norma europeia NBR 13698.....	41
Tabela 5.6 – Classificações dos filtros para particulados.....	45
Tabela 5.7 – Parâmetros gerais para realização de ensaios de filtros para particulados.....	45
Tabela 5.8 – Parâmetros relativos à geração e detecção do aerossol.....	46
Tabela 6.1 - Comparação entre diferentes equipamentos de testes de filtros para particulados.....	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFT	–	Automatic Filter Tester (Testador Automático de Filtros)
AIHA	–	American Industrial Hygiene Association
ACGIH®	–	American Conference of Governmental Industrial Hygienists
CA	–	Certificado de Aprovação
CEN	–	Comité Européen de Normalisation
CFR	–	Code of Federal Regulation (Estados Unidos)
COV	–	Coeficiente de Variação
DM	–	Dust/Mist (Poeiras/Névoas)
DMF	–	Dust/Mist/Fume (Poeiras/Fumos/Névoas)
DOP	–	Di-octil phthalate (Ftalato de 2-(dietil hexila))
EN	–	Européen Norm (Norma Européia)
EPI	–	Equipamento de Proteção Individual
EPR	–	Equipamento de Proteção Respiratória
FPA	–	Fator de Proteção Atribuído
FPR	–	Fator de Proteção Requerido
FUNDACENTRO	–	Fundação Jorge Duprat de Figueiredo de Segurança e Medicina do Trabalho
ISRP	–	International Society for Respiratory Protection
ISO	–	International Organization for Standardization
LT	–	Limite de Tolerância
Moore's	–	Denominação pela qual o equipamento de testes de filtros para particulados, que utilize cloreto de sódio e fotometria de chama é conhecido.
MPI	–	Massa de Particulado Inalável
MPPS	–	Tamanho de partículas mais penetrante
MPR	–	Massa de Particulado Respirável
MPT	–	Massa de Particulado de Penetração Torácica
MTE	–	Ministério do Trabalho e Emprego
NBR	–	Norma Brasileira
NIOSH	–	National Institute for Occupational Safety and Health

NR	–	Norma Regulamentadora
PNOS	–	Partículas insolúveis ou fracamente solúveis não classificadas de outra maneira
PPR	–	Programa de Proteção Respiratória
TC/SC	–	Technical Committee / Sub Committee
TLV [®] -TWA	–	Threshold Limit Value – Time Weighted Average
TSI	–	Marca de equipamentos de testes que utilize cloreto de sódio ou substâncias oleosas e detecção por fotometria de dispersão de luz.
USEPA	–	United States Environmental Protection Agency
USBM	–	United States Bureau of Mines
USMSHA	–	United States Mine Safety and Health Administration

LISTA DE SÍMBOLOS

$\mu\text{g}/\text{m}^3$	—	micrograma por metro cúbico
μm	—	micrometro
kPa		kilopascal.
L/min.	-	litro por minuto
mg/m^3	—	miligramo por metro cúbico
mbar	-	milibar
mmH_2O	-	milímetros de água
nm	-	nanômetro
$^{\circ}\text{C}$	-	temperatura Celsius

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONCEITUAÇÃO DO TEMA	1
1.2	OBJETIVOS	3
1.3	JUSTIFICATIVAS.....	3
2	METODOLOGIA	5
3	PARTICULADOS NA INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO	7
3.1	CARACTERÍSTICAS DOS PARTICULADOS.....	7
3.2	LIMITE DE EXPOSIÇÃO OCUPACIONAL	10
4	EQUIPAMENTOS DE PROTEÇÃO RESPIRATÓRIA (EPR)	14
4.1	CLASSIFICAÇÃO DOS EPRS	14
4.1.1	Seleção dos EPRs	18
4.2	FILTROS PARA PARTICULADOS.....	20
4.2.1	Mecanismos de captura dos filtros para particulados	22
4.2.2	Filtros mecânicos	26
4.2.3	Filtros eletrostáticos	27
4.2.4	Avaliação de desempenho de filtros para particulados	29
4.2.4.1	<i>Penetração e eficiência</i>	<i>30</i>
5	NORMAS DE TESTES DE FILTROS PARA PARTICULADOS....	32
5.1	APROVAÇÃO DE FILTROS PARA PARTICULADOS	
	SEGUNDO A 42 CFR 84.....	32

5.1.1	Classificação dos filtros	33
5.1.2	Métodos de ensaio de penetração através do filtro	34
5.1.2.1	<i>Pré-condicionamento</i>	34
5.1.2.2	<i>Aerossóis de teste.....</i>	34
5.1.2.2.1	Sistema de detecção	35
5.1.2.2.2	Procedimento de teste.....	35
5.2	APROVAÇÃO DOS FILTROS PARA PARTICULADOS	
	SEGUNDO A NORMA EN 143 (CEN, 2006)	36
5.2.1	Classificação dos filtros	36
5.2.2	Ensaio de penetração através dos filtros para particulados	
	37	
5.2.2.1	<i>Pré-condicionamento</i>	38
5.2.2.1.1	Pré-condicionamento de resistência mecânica	38
5.2.2.1.2	Pré-condicionamento de temperatura	38
5.2.2.2	<i>Aerossóis de teste.....</i>	38
5.2.2.2.1	Cloreto de sódio	38
5.2.2.2.2	Óleo de parafina	39
5.2.2.3	<i>Procedimentos de teste</i>	39
5.3	APROVAÇÃO DE FILTROS PARA PARTICULADOS	
	SEGUNDO NBR 13697 (ABNT, 1996 A) E 13698 (ABNT, 1996 B) ..	40
5.3.1	Classificação dos filtros	40
5.3.2	Método de testes	42
5.3.2.1	<i>Pré-condicionamento de vibração</i>	42
5.3.2.2	<i>Ensaio do cloreto de sódio.....</i>	42
5.3.2.2.1	Princípio do método.....	42
5.3.2.2.2	Procedimentos de teste	43
5.3.2.3	<i>Ensaio do óleo de parafina</i>	43
5.3.2.3.1	Princípio do método.....	43
5.3.2.3.2	Procedimentos de teste	43
5.4	COMPARAÇÕES E DISCUSSÕES SOBRE AS NORMAS	
	APRESENTADAS	45

6 EQUIPAMENTOS DE TESTES DE FILTROS P/ PARTICULADO	48
6.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO EQUIPAMENTO MOORE'S	50
6.1.1 Descrição do equipamento	51
6.1.2 Gerador de aerossol	52
6.1.3 Sistema de detecção	53
6.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO EQUIPAMENTO TSI AFT 8130	54
6.2.1 Gerador de aerossol	56
6.2.2 Sistema de detecção	56
6.3 ESTUDOS COMPARATIVOS ENTRE EQUIPAMENTOS DE TESTES DE FILTROS PARA PARTICULADOS.	58
6.3.1 Introdução	58
6.3.2 Estudos preliminares para o desenvolvimento do TSI 8110	59
6.3.2.1 Metodologia utilizada no estudo para desenvolvimento do TSI 8110	59
6.3.2.2 Resultados obtidos no estudo para desenvolvimento do TSI 8110	60
6.3.3 Ensaaios comparativos realizados pelos laboratórios europeus	61
6.3.3.1 Metodologia utilizada no estudo europeu	62
6.3.3.2 Resultados obtidos no estudo europeu	63
6.3.3.3 Conclusões do estudo europeu	70
6.3.4 Programa inter-laboratorial round robin	70
6.3.4.1 Objetivos do programa "round robin"	74
6.3.4.2 Protocolo de testes "round robin"	74
6.3.4.3 Resultados obtidos no programa "round robin"	75
6.3.4.3.1 Repetibilidade	75
6.3.4.3.1.1 Repetibilidade de resultados do TSI 8110	76

6.3.4.3.1.2	Repetibilidade de resultados do Moore's.....	80
6.3.4.3.1.3	Comparativos de variabilidade por equipamento	82
6.3.4.3.2	Comparações entre o Moore's e TSI 8110 e 8130.....	84
7	DISCUSSÃO	88
8	CONCLUSÕES	91
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONCEITUAÇÃO DO TEMA

Os aerossóis sólidos ou líquidos são formados por particulados em suspensão e comumente encontrados em ambientes de trabalho onde são desenvolvidas atividades industriais ou de serviços. Na indústria de mineração, há formação de aerossóis sólidos nas operações de desmonte, transporte e cominuição de mineral. Há também formação de aerossol líquido oleoso nas atividades de explosão de rochas e combustão nos motores dos veículos utilizados para o transporte e movimentação de material no interior da usina. Estes aerossóis, definidos como agentes químicos pela Norma Regulamentadora NR-15 (BRASIL, 1978), se inalados, dependendo de sua composição química e características físicas, podem causar reações adversas no sistema de saúde do trabalhador exposto. A NR-22 (BRASIL, 2003) estabelece que devam ser adotadas medidas técnicas e administrativas que, reduzam, eliminem ou neutralizem os efeitos das poeiras minerais à saúde do trabalhador em áreas de mineração.

De acordo com a Norma Regulamentadora NR-9 (BRASIL, 1994), o uso de Equipamento de Proteção Individual (EPI), entre os quais inclui o Equipamento de Proteção Respiratória (EPR) deve ser considerado como o último recurso para controle da exposição do trabalhador a agentes químicos. Os benefícios do uso do EPR ao usuário dependem fundamentalmente das condições de vedação facial, da eficiência do meio de filtração e do tempo de uso do equipamento.

As limitações do EPR estão relacionadas com as características físicas, químicas e concentração do aerossol presente no ambiente de trabalho. Diferentes tipos de equipamentos de proteção respiratória são indicados para situações particulares de exposição do trabalhador, quando se considera o tipo de cobertura facial e a forma como o ar chega ao interior desta cobertura. Por exemplo, em algumas situações de risco, apenas equipamentos do tipo linha de ar comprimido com peça facial inteira ou capuz pode ser utilizado. Respiradores semifaciais para poeiras somente

podem ser utilizados para proteção em ambientes com concentrações inferiores a dez vezes o limite de exposição ocupacional. No capítulo 4.1,1 – Seleção de EPRs são apresentados os critérios que devem ser seguidos para seleção de respiradores.

Segundo a NBR 12543 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1999), os EPRs são divididos em duas classes: equipamentos purificadores de ar e equipamentos de adução de ar. Nos equipamentos de adução, o ar é captado fora da área de trabalho e comprimido, supostamente limpo. Deve-se tomar cuidado quanto à qualidade do ar, pois a presença de monóxido de carbono possivelmente gerado no processo de compressão, partículas oleosas, água e outros contaminantes podem comprometê-la.

Nos equipamentos purificadores de ar existem filtros para retenção dos agentes químicos presentes nas formas de poeiras, névoas, fumos, neblinas, gases e vapores encontrados no ambiente de trabalho. As denominações aerossol, aerodispersóide, material particulado, partículas ou particulados são utilizadas de forma genérica em substituição aos termos específicos poeiras, névoas, fumos e neblinas na literatura científica, normas, regulamentos e leis. O termo contaminante atmosférico é ainda mais genérico e refere-se a toda matéria em suspensão ou misturada nos gases que constituem a atmosfera, incluindo, portanto, gases e vapores. O filtro utilizado no equipamento purificador de ar deve ser selecionado de acordo com as características químicas e físicas dos contaminantes, conforme procedimentos de seleção de filtros para respiradores definidos por Torloni (2002).

Os filtros para particulados são largamente utilizados na indústria, e em especial na indústria de mineração. Para ser aprovado como parte de um equipamento de proteção respiratória, deve passar por ensaios realizados em laboratórios credenciados pelo Ministério do Trabalho e Emprego (MTE), conforme estabelecido na NR-6 (BRASIL, 2006). Procedimentos para realização destes ensaios, bem como os requisitos de desempenho e marcações que devem ser atendidos estão definidos na norma brasileira NBR 13697 (ABNT, 1996). Sistemas similares de aprovação estão também definidos em outros países. A norma brasileira, publicada em junho de 1996, foi baseada no texto da versão de 1991 da norma europeia EN 143 (COMISSÃO EUROPÉIA DE NORMALIZAÇÃO, 2006). Nos Estados Unidos, desde julho de 1995 está em vigor a norma 42 CFR, part 84 (EUA, 1995) para aprovação de filtros utilizados em respiradores. Essa norma influenciou fortemente

a comunidade de especialistas em proteção respiratória em todo mundo e motivou o desenvolvimento de novos equipamentos para ensaio de filtros.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho teve os seguintes objetivos:

- Comparar três métodos de ensaios para a aprovação de filtros para particulados utilizados em respiradores purificadores de ar não motorizados e relacionar as condições de ensaios dos filtros com as condições de trabalho de minerações onde os mesmos são usados.
- Avaliar a viabilidade da substituição do equipamento de testes Moore's especificado nas normas brasileiras de filtros para particulados, utilizado pela FUNDACENTRO para elaboração de laudo técnico; pelos equipamentos da TSI utilizados em laboratórios de fabricantes de EPIs e pela FUNDACENTRO, porém com propósitos de controle de qualidade e testes comparativos, apenas.

1.3 JUSTIFICATIVAS

Desde a publicação da norma NBR 13697 (ABNT, 1996), mudanças fundamentais ocorreram nas normas européia e norte-americana. A norma brasileira tampouco tem sido utilizada na íntegra pela Fundacentro, único laboratório de testes de respiradores credenciado pelo MTE. O ensaio de filtros com óleo de parafina não é realizado por dificuldades operacionais com o equipamento utilizado para esse ensaio, o qual é recomendado para filtros especificados para proteção contra particulados oleosos. Alguns ambientes de trabalho encontrados em minerações estão contaminados com particulados oleosos que, dependendo de suas concentrações, poderiam requerer tais filtros.

O laboratório da Fundacentro e outros laboratórios nacionais pertencentes a fabricantes de respiradores possuem dois modelos de equipamentos da TSI, AFT 8110 e AFT 8130, que podem ser usados para realização de ensaio com

particulados oleosos. Porém, seguindo procedimentos de testes diferentes daquele estabelecido na NBR. Esses equipamentos também permitem a realização do ensaio com cloreto de sódio, igualmente especificado na NBR 13697 (ABNT, 1996). Os equipamentos da TSI têm sido utilizados por laboratórios em vários países.

2 METODOLOGIA

Nesta pesquisa foram utilizados dados e informações produzidas em estudos realizados no período compreendido entre 1990 e 2006, por Kenneth L. Simpson, Michael Cadalbert e Grahan Bostock sobre desempenho de instrumentos de testes de filtros para particulados utilizados em respiradores. O acesso a esses dados foi possível graças à concessão feita por Dr. Michael Runge, diretor técnico, da empresa 3M Company, situada no estado de Minnesota, Estados Unidos. Foi também realizada uma revisão da literatura referente a particulados na exploração e tratamento de minerais, efeitos adversos à saúde, equipamentos de proteção respiratória, filtros para particulados e normas contendo métodos de testes de filtros para particulados.

A pesquisa foi dividida em duas partes. Na primeira parte foi feita a revisão da literatura e a segunda parte foi dedicada a comparações entre normas de testes de filtros para particulados, diferenças construtivas e operacionais de instrumentos utilizados para testes de filtros, e resultados de estudos comparativos realizados com esses instrumentos.

A primeira parte foi desdobrada em quatro temas. Nos dois primeiros temas foram obtidas informações específicas sobre riscos de particulados emitidos e limites de exposição. Foi feita uma investigação sobre composição e dimensão dos particulados encontrados em minas de carvão, minerais metálicos, não metálicos e pedreiras. Avaliada a presença tanto de sílica cristalina, como de particulados oleosos emitidos por processos de combustão de óleo diesel e outros óleos combustíveis.

O terceiro tema avalia o uso de proteção respiratória, com informações sobre tipos e classes de respiradores, critérios para seleção do equipamento adequado a cada necessidade e do filtro mais apropriado para determinado equipamento. Por fim, foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre funcionamento de filtros para particulados, mecanismos de captura de partículas sólidas e líquidas, interação dessas partículas com a superfície da fibra, degradação das cargas eletrostáticas e conceitos básicos sobre avaliação de eficiência desses filtros.

A segunda parte foi dedicada a comparações entre normas de testes, funcionamento e desempenho de instrumentos para realização dos ensaios com filtros para particulados. Nesta segunda parte da pesquisa foram utilizados canais formais, tais como: publicações, livros e textos de normas; e informais, oriundos da experiência do autor em trabalhos realizados em comissões de estudos da ABNT, para elaboração de normas para proteção respiratória, e comitê internacional da ISO SC15/TC94, esse último estabelecido no ano de 2002, com o objetivo de escrever normas para especificação e métodos de testes para equipamentos de proteção respiratória. A conclusão dos trabalhos desse comitê está planejada para se encerrar em 2008.

Por fim, foram utilizadas as informações produzidas nos estudos comparativos de desempenho de instrumentos de testes de filtros para particulados. O objetivo desses estudos foi avaliar a proficiência de laboratórios de pesquisas, de aprovação e de controle de qualidade em operações de manufatura de respiradores, localizados em vários países, inclusive o Brasil. O acesso a alguns relatórios publicados no encerramento desses programas foi restrito a informações que continham resultados coletivos desses testes, sem que fossem identificadas a localização e propriedade de cada equipamento, pois, de acordo com os protocolos definidos para esses ensaios, somente o proprietário do equipamento tem acesso à informação individualizada.

3 PARTICULADOS NA INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO

3.1 CARACTERÍSTICAS DOS PARTICULADOS

Muitos processos utilizados na indústria de mineração facilitam a formação de material particulado indesejado. A tecnologia na qual se baseiam esses processos nem sempre permite modificações que resolvam, na fonte, a emissão de particulados e outros contaminantes atmosféricos, conforme determina a NR-9 (Brasil, 1994). De acordo com essa norma, o controle de emissões de agentes químicos no ar deve ser feito, prioritariamente, através de substituições de matérias-primas por outras que sejam menos agressivas e modificação de processo produtivo. Os processos de prospecção, lavra, cominuição e separação de minerais estão entre aqueles com maiores dificuldades para controle de emissões de materiais particulados na fonte.

Por utilizarem equipamentos fixos, os processos de cominuição e separação podem ser providos de enclausuramento, sistemas de exaustão localizada, ou outro controle de engenharia aplicada. Para ser efetivo, o sistema de controle deve ser projetado de acordo com as características do processo e do material particulado a ser coletado. É muito comum encontrar nesses processos sistemas mal projetados, os quais consomem grande quantidade de energia, provocam ruído excessivo, necessitam de manutenção constante devido a desgastes em motores e tubulações e possuem baixa eficiência de coleta dos contaminantes atmosféricos.

Processos e operações realizadas a céu aberto possuem grande potencial para provocar problemas ambientais. Em contrapartida, os processos subterrâneos ou realizados em ambientes fechados podem ser mais perigosos sob o ponto de vista ocupacional, uma vez que os aerossóis se concentram na atmosfera, o que pode torná-la imprópria para a respiração humana.

A composição química desses materiais é variável e depende da composição do minério ou mineral explorado. A sílica está freqüentemente presente em ambientes de mineração, uma vez que é parte da composição de rochas e solo. O quartzo,

forma mais comum de sílica cristalina, é o segundo mineral em presença na crosta terrestre e um dos mais perigosos agentes químicos para respiração humana. O Brasil é o maior produtor de quartzo do mundo e esse mineral está presente também em outras rochas. No granito o teor de quartzo varia de 25 a 40%; e em média de 67 % em arenitos (American Conference of Governmental Industrial Hygienists - ACGIH[®], 2006).

Gruezner (2003) estudou poeiras contendo sílica livre cristalina em ambientes de trabalho em pedreiras. As avaliações utilizaram técnicas de monitoramento pessoal, com período de amostragem variando entre 200 e 340 minutos e ciclone para separação de poeiras respiráveis. Os valores de concentração de poeira respirável variaram entre 0,05 e 3,76 mg/m³, sendo a percentagem de quartzo variando entre valores menores que 2,6% a 29,2%. Alguns valores de concentração ultrapassaram em quase 20 vezes o valor do TLV[®] para poeiras respiráveis contendo quartzo.

Na operação de desmonte com utilização de explosivo é gerada uma grande quantidade de material particulado, composto principalmente por fragmentos de rocha, areia, terra e fuligem. As dimensões desse material são variáveis, porém predominam particulados de rocha com dimensões acima de 2 µm e fuligens, com dimensões bem abaixo deste valor. (JONES, 2003)

Almeida (1999) pesquisou material particulado emitido por duas minerações situadas na região da grande São Paulo, sendo uma de pequeno porte e outra de grande porte. Alguns valores de concentração encontrados para material particulado total foram superiores a 500 µg/m³, para um padrão primário de concentração diária na atmosfera é de 240 µg/m³. Padrões primários de qualidade de ar são concentrações de poluentes que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população. Alguns dos valores observados nessa pesquisa ultrapassaram o valor do padrão primário para material particulado.

Sua pesquisa também mostrou que: a) menos de 10% dos particulados encontrados estavam associados com a fração respirável (partículas menores que 2,5 µm); b) o diâmetro médio de particulados encontrados variou de 18,5 µm na mineração de grande porte a 25,1 µm na pedreira. c) o diâmetro médio dos particulados encontrados na área urbana foi de 30 µm e apenas 2,4% de Massa de Particulado Respirável (MPR); d) na composição química dos aerossóis encontrados nas pedreiras foram identificados apenas óxidos metálicos; há uma

boa correlação entre o material encontrado no ar amostrado e o produto processado; e) quase 40% de material particulado amostrado na mineração de grande porte teve perda ao fogo durante o processo analítico. Isso sugere a presença de material orgânico na amostra coletada. O estudo não identificou as características nem a origem desse material. Considerando que todo esse material orgânico seja constituído por fuligem proveniente da queima incompleta de diesel, ainda assim sua concentração seria inferior a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

McDonald et.al. (2002) identificaram partículas finas contendo carbono (elementar e orgânico), íons (sulfato e nitrato) e metais em minas subterrâneas. Cerca de 70% do material particulado fino encontrado continha carbono. A maioria desse material apresentava diâmetro médio mássico aerodinâmico abaixo de $1 \mu\text{m}$, e uma grande parte estava abaixo de $0,2 \mu\text{m}$. Uma das amostras superou o valor de concentração de $2,5 \text{ mg}/\text{m}^3$.

Em estudos realizados em várias minas subterrâneas foram encontradas concentrações de particulados de diesel entre 100 a $2100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Estudos semelhantes em minas a céu aberto nos Estados Unidos mostraram valores de particulados de diesel inferiores a $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ neste tipo de operação. (HANEY, R.A; SASEEN G.P; WAYTULONIS R.W; 2000).

Equipamentos que utilizam combustão de óleo diesel, entre os quais se incluem equipamentos de transportes e de produção, são muito comuns em operações de mineração. Holz apud Davies (2004) discutiu sobre a composição dos gases emitidos em interiores de usinas subterrâneas e túneis, gerados por motores a combustão. Identificou duas fases. A primeira ocorre logo após o motor ter sido ligado, durante o aquecimento, quando se observa uma bruma azul na saída do escapamento. Isso é atribuído a material não queimado ou parcialmente queimado e a intensidade da cor vai sendo diminuída gradualmente, à medida que o motor vai se aquecendo. A segunda fase ocorre quando há aumento na carga de trabalho sobre o motor. Neste momento a exaustão torna-se cinza, quando observada pela luz transmitida através dos gases exauridos. Essa coloração cinza é atribuída a partículas de carvão presentes nos gases de exaustão, e pode se tornar preta com a diminuição da relação combustível: ar na câmara de combustão do motor.

Amman e Sieglapud Davies (2004) definiram os gases da combustão de diesel como sendo constituídos principalmente por fuligem de material carbonizado

associada a hidrocarbonetos não queimados. Através de foto-micrografia dos gases de exaustão de um automóvel, eles constataram que essas partículas são formadas por uma coleção de partículas esféricas menores, com diâmetro que variam entre 10 e 80 nm, as quais são aglomeradas em formato parecido com um cacho de uvas (tipicamente $< 1\mu\text{m}$). Essas partículas são capazes de adsorver quantidades significativas de hidrocarbonetos originados do combustível, óleos lubrificantes e das complexas reações químicas que ocorrem no interior do cilindro. Essa habilidade que esse material possui para absorver essas moléculas tem servido de base para estudos sobre efeitos adversos causados por material particulado de diesel.

A legislação norte americana, 30 CFR 57 (Estados Unidos, 1978 B), estabelece os seguintes valores de limite de exposição para materiais particulados suspensos na atmosfera, oriundos da combustão de diesel, em minas subterrâneas, para 8 horas de trabalhos diários: $308\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ expresso como carbono elementar, valor efetivo desde 20 de Maio de 2006; ou $350\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ expresso como carbono total, efetivo desde 20 de Janeiro de 2007; e $160\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ expresso como carbono total, a ser efetivado a partir de 20 de Maio de 2008. A diferença entre os valores de limite de exposição, expressos em carbono total ($350\ \mu\text{g}/\text{m}^3$) e carbono elementar ($308\ \mu\text{g}/\text{m}^3$), conforme estabelecido no documento 30 CFR 57 (Estados Unidos, 1978 B), sugere que cerca de 30% do carbono presente no material particulado de diesel são oriundos de hidrocarbonetos.

3.2 LIMITE DE EXPOSIÇÃO OCUPACIONAL

Os danos à saúde de um ser humano devidos à inalação de particulados suspensos no ar ambiente dependem principalmente do tamanho das partículas, o qual está diretamente relacionado com a probabilidade de se depositarem na região de troca gasosa ou serem eliminados na região superior do trato respiratório; e das características químicas da partícula, que influem na possibilidade de serem digeridos pelos macrófagos ou provocarem reações no tecido alveolar, como as fibroses.

Os limites de exposição ocupacional adotados no Brasil estão definidos na NR-15 (BRASIL, 1978), são denominados Limites de Tolerância (LT) e foram baseados nos valores de TLV[®] (Threshold Limit Values) publicados pela ACGIH[®] em 1977. A ACGIH[®] revisa esses valores anualmente, e incorpora no texto e na tabela de valores de limite de exposição os conhecimentos mais atuais sobre toxicologia de cada produto químico. De acordo com a ACGIH[®] (ABHO, 2006) os limites de exposição ocupacional são valores de concentrações sob os quais se acredita que a maioria dos trabalhadores possa ficar exposta diariamente durante toda a jornada de trabalho, por toda sua idade laboral, sem sofrer danos em seu sistema de saúde. De acordo com ABHO (2006) os particulados são classificados em frações de tamanhos de acordo com a probabilidade que eles têm de entrarem e se alojarem no sistema respiratório em:

- ✓ Massa de Particulado Inalável (MPI) – é aquela porção de material que oferece risco quando depositada em qualquer lugar do trato respiratório. Cinquenta por cento dos particulados nessa faixa possuem diâmetro médio mássico aerodinâmico¹ igual ou inferior a 50 µm, portanto $D_{50} = 50 \mu\text{m}$.
- ✓ Massa de Particulado de penetração Torácica (MPT) – é aquela porção de material que oferece risco quando depositada em qualquer lugar no interior das vias aéreas dos pulmões e na região de troca de gases (alvéolos pulmonares). Possuem D_{50} igual a 10 µm.
- ✓ Massa de Particulado Respirável (MPR) – é aquela porção de material que oferece risco quando depositada na região de troca de gases. Possuem D_{50} igual a 4 µm.

O Limite de Exposição para 8 horas de exposição TLV[®]-TWA para a sílica cristalina nas formas de quartzo ou cristobalita é 0,025 mg/m³, expresso em concentração de MPR. Esse valor foi estabelecido com a intenção de minimizar o potencial para desenvolvimento da fibrose pulmonar progressiva, conhecida como silicose. A ACGIH[®] acredita que, mesmo que sutil e não detectada por raios-X de tórax, a silicose pode ser um fator de risco para câncer pulmonar. Substâncias reconhecidas ou potencialmente causadoras de câncer em seres humanos ou animais recebem notações específicas A1, A2, A3, A4 ou A5. A notação A2 identifica agentes químicos suspeitos causadores de câncer humano. Essa

¹ Diâmetro de uma partícula de densidade unitária que possui a mesma velocidade de sedimentação da média das partículas em suspensão.

notação foi recomendada para a exposição à sílica cristalina, com base em registros de câncer pulmonar em pessoas com silicose (ACGIH[®], 2006).

Para grande parte dos agentes químicos contidos nos particulados que formam os aerossóis não existe um valor de limite de exposição especificado. É objetivo do comitê de TLV[®] da ACGIH[®] recomendar limites de exposição para todas as substâncias em relação às quais haja evidências de efeitos à saúde em concentrações no ar encontradas em locais de trabalho. Um valor de TLV[®] é estabelecido quando existem evidências suficientes para uma substância específica. A ACGIH[®] criou uma categoria de partículas em suspensão no ar conhecida como PNOS (Partículas insolúveis ou fracamente solúveis não especificadas de outra maneira) em substituição aos particulados incômodos, pois mesmo sendo biologicamente inertes, podem apresentar efeitos adversos à saúde do trabalhador, quando exposto a concentrações superiores a 10 mg/m³ para partículas inaláveis e 3 mg/m³ para partículas respiráveis. (ABHO, 2006)

O potencial para efeitos adversos à saúde causados pela exposição ocupacional a materiais particulados de diesel foi levantado há cerca de 30 anos. Um dos primeiros registros sobre o potencial carcinogênico das emissões de diesel foi escrito por Kotin et al (1955), o qual demonstrou o desenvolvimento de papilomas e câncer na pele de ratos submetidos a material particulado extraído com acetona. (DAVIES, 2004)

Em Maio de 2002, a USEPA (United States Environmental Protection Agency) publicou nos Estados Unidos um documento sintetizando várias informações acumuladas pela agência sobre os riscos da exaustão de diesel. O documento foi produzido com a intenção de identificar e caracterizar o potencial de perigo para a saúde humana provocado pelos gases de exaustão de diesel e estimar a relação entre exposição e doenças.

As conclusões do documento da USEPA foram baseadas em informações sobre motores a diesel que foram fabricados até os anos 90. Os efeitos a saúde foram divididos em três categorias:

- ✓ Efeitos agudos: irritação de olhos, garganta e brônquios, náusea, tosse e catarro.
- ✓ Efeitos respiratórios crônicos não carcinogênicos: existe potencial para desenvolvimento de doenças respiratórias, baseado em evidências em animais.

- ✓ Efeitos carcinogênicos crônicos: ficou evidenciado câncer de pulmão em grupos de exposição ocupacional e possível perigo para exposições ambientais mais baixas (DAVIES, 2002 p.11).

4 EQUIPAMENTOS DE PROTEÇÃO RESPIRATÓRIA (EPR)

Os equipamentos de proteção respiratória (EPR) são Equipamentos de Proteção Individual (EPI). O artigo 167 da lei 6514 estabelece que um equipamento de proteção individual só pode ser comercializado e utilizado com a indicação do Certificado de Aprovação (CA) do Ministério do Trabalho (BRASIL, 1977). Para obtenção do CA, esses equipamentos devem comprovar sua eficiência em teste de desempenho realizado em amostra, em laboratório credenciado pelo MTE. (BRASIL, 2006).

Os EPRs variam quanto à concepção, às aplicações e ao nível de proteção que podem proporcionar ao usuário.

4.1 CLASSIFICAÇÃO DOS EPRS

De acordo com a NBR 12543 (ABNT, 1999), os equipamentos de proteção respiratória podem ser divididos em duas grandes classes: os purificadores de ar e os de adução de ar. Uma terceira classe, não contemplada nessa norma, seria resultante da combinação dos respiradores citados anteriormente: de adução de ar com purificadores de ar. O diagrama da figura 4.1 mostra como os equipamentos de proteção respiratória se classificam.

Os respiradores purificadores de ar são também denominados dependentes da atmosfera ambiente. Neles, o ar ambiente, antes de ser inspirado, passa através de um filtro com o objetivo de remover os contaminantes.

Os respiradores de adução de ar, por sua vez, fornecem ao usuário outro gás respirável proveniente de uma atmosfera independente do ambiente. Em todos os respiradores desse tipo, a qualidade do ar deve ser controlada e atender aos parâmetros estabelecidos na NBR 12543 (ABNT, 1999). A figura 4.2 mostra um respirador do tipo adução de ar, com linha de ar comprimido e capuz.

Figura 4.1 - Classificação dos equipamentos de proteção respiratória de acordo com a NBR 12543 (ABNT, 1999).

Figura 4.2 - Respirador de linha de ar comprimido com capuz sendo utilizado em operação de carga de misturador. Fonte: Arquivo pessoal.

Nos respiradores purificadores de ar não motorizados, o ar passa, devido à ação pulmonar do usuário, através de um ou mais filtros que retêm os contaminantes, e entra na cobertura das vias respiratórias. Para garantir que o ar expirado e o inspirado escoem na direção correta, a maioria desses respiradores possui válvula de inalação e de exalação.

Os respiradores podem ter um ou mais filtros. As peças faciais de elastômero, como a mostrada na figura 4.3, exigem manutenção periódica, uma vez que as bordas de vedação, com trincas ou endurecidas pelo uso, e a válvula de exalação com resíduos provocam aumento acentuado de vazamento de contaminantes, e a diminuição decorrente do nível de proteção proporcionado pelo respirador. Já as peças semifaciais filtrantes mostradas na figura 4.4 podem ou não conter válvula de exalação e dispensam qualquer tipo de manutenção.

Figura 4.3 – Respirador semifacial com filtro para particulados da classe P2. Fonte: Arquivo pessoal.

Nos respiradores purificadores não motorizados, durante a inspiração, a pressão do ar na parte interna da peça facial permanece inferior à pressão do ambiente – por isso são também denominados respiradores de pressão negativa. Isso provoca a entrada de ar através do filtro, mas, por outro lado, ao mesmo tempo facilita a entrada de ar contaminado devido à falta de vedação da peça facial no rosto, que nunca é absoluta. Portanto, o ar que chega aos pulmões do usuário é uma mistura de ar purificado pelo elemento filtrante adequado com uma pequena quantidade de ar contaminado, o qual penetrou diretamente pelos vazamentos ocorridos nas zonas de contato das bordas de vedação da peça facial com o rosto (TORLONI; VIEIRA, 2003, p.184).

Torloni e Vieira (2003) afirmam que a quantidade de ar contaminado que penetra pode ser minimizada pelo desenho anatômico das bordas dessa peça, pela seleção do material empregado na sua confecção, bem como pelos cuidados de manutenção do conjunto, pela escolha da peça facial que melhor adapta ao rosto do usuário e pela tensão provocada pelos tirantes que mantêm a cobertura das

vias respiratórias na posição correta. O tipo de respirador purificador de ar mais simples é o com peça semifacial filtrante

Figura 4.4 - Respirador semifacial filtrante para particulados com filtro da classe P1 sendo utilizado em mineração. Fonte: Arquivo pessoal.

4.1.1 Seleção dos EPRs

O uso de respiradores, também conhecidos como Equipamentos de Proteção Respiratória (EPR) deve ser considerado como o último recurso para controle da exposição do trabalhador a agentes químicos. Medidas de controle de processo, sistemas de ventilação exaustora e medidas administrativas devem ser tomadas prioritariamente ao uso de equipamento de proteção respiratória.

Para que o uso de EPR alcance resultados na prevenção de doenças respiratórias ocupacionais é necessário que sejam satisfeitos, no mínimo, os seguintes requisitos: a) seleção de respiradores e filtros adequados; b) uso correto e consideração sobre as limitações do EPR; c) vedação facial apropriada (TORLONI, 2002).

É considerado respirador adequado, aquele que consegue diminuir a exposição do trabalhador a níveis de concentração menores que o limite de exposição ocupacional. As limitações do Equipamento de Proteção Respiratória estão relacionadas, principalmente, à concentração do aerossol no ambiente de trabalho. A Instrução Normativa nº. 1 apresenta uma tabela de Fatores de Proteção Atribuídos (FPA) para cada tipo de respirador. O FPA, como mostra a tabela 4.1, é definido de acordo com o tipo de cobertura facial utilizado pelo EPR e a forma como o ar chega ao interior desta cobertura. (TORLONI, 2002)

Os valores de FPA indicam quantas vezes a concentração do contaminante no ar inalado será menor que no ar ambiente, quando são obedecidos todos os requisitos listados abaixo:

- a) Respirador e filtros adequados ao uso;
- b) Tamanho apropriado ao rosto do usuário;
- c) Colocação e ajustes feitos corretamente;
- d) Respirador em bom estado de conservação e manutenção;
- e) Ausência de barba e outros pêlos faciais;
- f) Respirador utilizado por todo o tempo de exposição à atmosfera contaminada;
- g) Treinamento.

Torloni (2002) apresenta as etapas para a seleção do respirador e dos filtros. Para a seleção do tipo de respirador deve-se avaliar a concentração do agente químico representativa da exposição do trabalhador ao risco e calcular o Fator de Proteção Requerido (FPR), de acordo com a eq.(4.1).

$$FPR = \frac{\text{Concentração}}{LE} \quad (4.1)$$

Onde:

FPR = Fator de Proteção Requerido

Concentração = Concentração do agente químico no ambiente que represente a exposição do trabalhador.

LE = Limite de Exposição

Realizado este cálculo, procura-se um tipo de respirador que possua FPA maior que o FPR calculado, conforme eq.(4.2).

FPA > FPR (4.2)

Onde:

FPA = Fator de Proteção Atribuído.

FPR = Fator de Proteção Requerido.

Tabela 4.1 – Fatores de Proteção Atribuídos (FPA para respiradores)

Tipos de Respirador		Tipo de Cobertura das Vias Respiratórias			
Pressão Negativa na peça facial		Peça Semifacial		Peça Facial Inteira	
Purificador de Ar		10		100	
De Adução de Ar					
Máscara Autônoma (demanda) (a)				100	
Linha Ar Comprimido (demanda)		10		100	
Pressão Positiva na peça facial		Peça Semifacial	Peça Facial Int.	Capuz Capacete	Sem Vedaç. Facial
Purificador de Ar Motorizado		50	1.000	1.000	25
De Adução de Ar					
Linha Ar Comprimido					
De demanda e pressão positiva		50	1.000		
Fluxo contínuo		50	1.000	1.000	
Máscara Autônoma					
De demanda e pressão positiva			10.000 (b)		

(a) Não deve ser usada para situações de emergências, como incêndios.
(b) Para uso em situações de emergências.

Adaptação da tabela de Fator de Proteção contida em Torloni, 2002, p.18. Fonte: Arquivo pessoal.

4.2 FILTROS PARA PARTICULADOS

Os EPRs do tipo purificador de ar incorporam um ou mais filtros. De acordo com Torloni (p.26-29, 2002) a seleção do filtro deve ser feita de acordo com o tipo e composição do agente químico presente na atmosfera, seguindo os seguintes passos:

g) se o contaminante for um gás ou vapor, escolher o filtro químico apropriado. As seguintes condições devem ser satisfeitas simultaneamente: 1) a concentração do contaminante no ambiente deve ser menor que sua concentração IPVS; 2) a concentração do contaminante no ambiente deve ser menor que a MCU (Máxima Concentração de Uso) do filtro; 3) o filtro químico deve ser compatível com a peça facial selecionada; 4) verificar as

propriedades de percepção do gás e/ou vapor (item m); Se também estiver presente contaminante do tipo aerossol, continuar no item h;

h) se o contaminante for a base de tinta, esmalte ou verniz, contendo solvente orgânico, escolher filtro combinado: filtro químico contra vapores orgânicos e filtro mecânico classe P1 (ou filtro químico de baixa capacidade FBC1 para vapor orgânico combinado com peça semifacial filtrante PFF1* se o fator de proteção requerido for menor que 10). Se não for, continuar no item i;*

i) se o contaminante for um agrotóxico, e veículo orgânico, usar filtro combinado: filtro químico para vapores orgânicos e filtro mecânico classe P2 (ou filtro químico de baixa capacidade para vapor orgânico FBC1 combinado com peça semifacial filtrante para partículas classe PFF2, se o Fator de Proteção Requerido for menor que 10); se o contaminante for um agrotóxico em veículo água, usar filtro mecânico classe P2 (ou peça semifacial filtrante para partículas PFF2, se o Fator de Proteção Atribuído for menor que 10). Se não for, continuar no item j;*

j) se o contaminante for um aerossol mecanicamente gerado (por exemplo, poeiras e névoas), usar filtro mecânico classe P1 (ou peça semifacial filtrante para partículas PFF1, se o Fator de Proteção Requerido for menor que 10). Se não for, continuar no item k;*

k) se o aerossol for um contaminante termicamente gerado (por exemplo, fumos metálicos), usar filtro P2 (ou peça semifacial filtrante para partículas classe PFF2, se o Fator de Proteção Requerido for menor que 10). Se não for, continuar no item l;

l) se o contaminante for um aerossol que contenha sílica cristalizada ou asbesto, a seleção deve ser feita de acordo com específicas;

m) se o contaminante for um gás ou vapor com fracas propriedades de alerta é recomendado, de modo geral, o uso de respiradores de adução de ar. Se estes não puderem ser usados por causa da inexistência de fonte de ar respirável, ou por causa da necessidade de mobilidade do trabalhador, o respirador purificador de ar poderá ser utilizado somente quando:

- o filtro químico possuir um indicador confiável de fim de vida útil que alerte o usuário antes do contaminante começar a atravessar o filtro;*

- existir um plano de troca de filtros que leve em conta a vida útil do filtro, bem como a depreciação (a não ser que a troca de filtros seja diária), a concentração esperada, o modo de usar e o tempo de exposição forem estabelecidos, e que o contaminante não possua um Limite de Tolerância – Valor Teto.*

() Se o contaminante for altamente tóxico ou de toxidez desconhecida, deverá ser selecionado filtro de classe P3 (ou peça semifacial filtrante classe PFF3 se o Fator de Proteção Requerido for menor que 10).*

Os filtros para particulados devem ser selecionados de acordo com o tipo, toxicidade e dimensões dessas partículas. Eles devem ter capacidade para retenção de aerossóis sólidos ou líquidos. O nível de proteção de um respirador (FPA) fica comprometido se o filtro não for adequado para retenção de todos os agentes químicos presentes no ambiente de trabalho, ou quando houver falhas em outras partes do equipamento, tais como: válvulas, vedação facial, existência de rasgos, furos, etc.

4.2.1 Mecanismos de captura dos filtros para particulados

Os filtros utilizados em proteção respiratória são formados por uma camada de fibras finas dispostas ao acaso, que obrigam as partículas do contaminante a se deslocarem em uma trajetória tortuosa e extensa em relação a seu tamanho. Por essa razão, é muito baixa a probabilidade de a partícula atravessar o filtro sem entrar em contato com as fibras. Ao chegarem à camada filtrante transportadas pelo ar, elas somente serão retidas se tocarem a superfície de uma das fibras que a constitui. A probabilidade de esse fato ocorrer depende principalmente do diâmetro, da composição e da forma da partícula e da fibra, e também da velocidade do ar. A retenção das partículas na superfície é provocada pelas forças de Van der Waals, elétricas ou de tensão superficial (se a partícula for líquida), sendo bastante difícil removê-las da fibra. (T0RLONI E VIEIRA, p. 242, 2002)

Quando passam pelo vão das fibras da camada fibrosa, as partículas que constituem o aerossol são capturadas graças à ação de quase uma dezena de mecanismos que atuam simultaneamente. Os principais são: interceptação direta, inércia, difusão e atração eletrostática. Atualmente, os filtros são fabricados com materiais que acentuam a captura de partículas pela ação eletrostática. Nas fotografias mostradas nas figuras 4.5 e 4.6 é possível notar como as partículas se depositam sobre a fibra. Na figura 4.5 está um filtro novo, não utilizado.

Figura 4.5 – Fotografia microscópica de um filtro de microfibras de polipropileno sem uso, com uma fibra em destaque. Fonte: Arquivo pessoal.

A figura 4.6 retrata as partículas depositadas na superfície da fibra. Nota-se que as partículas possuem dimensões muito inferiores às aberturas existentes para passagem do fluxo de ar. A interação das partículas só ocorre por força dos mecanismos citados acima.

Figura 4.6 – Fotografia microscópica de um filtro de microfibras de polipropileno usado. Fonte: Arquivo pessoal.

As partículas em suspensão no ar são forçadas a passarem pelo meio de filtração por ação da respiração do usuário ou por algum mecanismo que movimente a massa de ar e faça com que o ar passe através do filtro. Esse último é o caso de respiradores motorizados. A maneira pela qual uma determinada partícula se choca com uma fibra, em particular, depende fundamentalmente de certas propriedades

da partícula e do meio de filtração. Partícula grande, mais densa, como mostrada na ilustração da figura 4.7, tende a manter-se na mesma direção do fluxo devido à inércia, afasta-se da linha de fluxo, e por fim se choca com a fibra. Esse mecanismo é conhecido como impactação inercial. Esse mecanismo inclui a peneiração das partículas.

Figura 4.7 – Representação gráfica do mecanismo de impactação inercial para captura de particulados pelos filtros. Adaptado Hinds, 1982.

A interceptação direta ocorre quando a partícula segue uma linha de fluxo que a coloca em contato com a fibra, como ilustrado na figura 4.8. Se a velocidade da corrente gasosa e das partículas for elevada, mesmo as que apresentam tamanho reduzido irão comportar-se como as da figura 4.7.

Figura 4.8 – Representação gráfica do mecanismo de interceptação para captura de particulados pelos filtros. Adaptado de Hinds, 1982.

Por sua vez, partículas pequenas, as quais possuem diâmetros aerodinâmicos menores que $0,2 \mu\text{m}$, migram através das linhas de fluxo do ar, devido ao movimento browniano, o que permite que toquem a superfície da fibra, como mostrado na figura 4.9, (HINDS, p.179, 1982)

Figura 4.9 – Representação gráfica do mecanismo de difusão browniana para captura de particulados pelos filtros. Adaptado de Hinds, 1982.

Se a fibra ou a partícula estiver carregada eletricamente, poderá ocorrer a captura desta última, em razão da ação eletrostática direta, ou então, de indução elétrica preliminar e posterior atração, como ilustrado na figura 4.10.

Figura 4.10 – Representação gráfica do mecanismo de força eletrostática para captura de particulados pelos filtros. Adaptado de Hinds, 1982

Para partículas de um dado material, a penetração em uma camada filtrante, provocada pela difusão, depende do tamanho das partículas, isto é, quanto menores elas forem, menor será a penetração. Já a penetração que tem como causa a inércia, diminui à medida que aumenta o tamanho da partícula. A ação eletrostática, por sua vez, é praticamente independente do tamanho das partículas. Partículas muito pequenas não são as mais penetrantes, ou seja, as mais difíceis de serem capturadas pelas fibras. A figura 4.11 mostra que existe um tamanho de partícula cuja penetração no filtro é maior. Pela curva apresentada, as mais difíceis de serem capturadas são aquelas com diâmetros, cuja faixa está entre 0,3 e 0,6 μm .

Figura 4.11 – Variação de penetração com o diâmetro das partículas e da velocidade (V_0) do ar que as transporta (Adaptado de Hinds, 1982). Fonte: Manual de Proteção Respiratória (TORLONI E VIEIRA, 2003, p.245)

Se a partícula que chega é oleosa ou ionizada, a penetração pode aumentar com a quantidade depositada em consequência da diminuição da contribuição da ação eletrostática. A ocorrência desse fenômeno denomina-se degradação da eficiência. Quando em um filtro para particulados o mecanismo de captura preponderante é o eletrostático, ele é denominado filtro eletrostático. Quando a ação eletrostática não é importante (filtros de lã de vidro, celulose, polímeros sem carga elétrica), os filtros denominam-se filtros mecânicos. (TORLONI e VIEIRA, 2003, p. 242 - 246)

4.2.2 Filtros mecânicos

A eficiência dos filtros mecânicos é determinada por características mecânicas tais como diâmetro, orientação, e arranjo das fibras que compõem o filtro. Os filtros eletrostáticos possuem carga elétrica sobre as fibras para aumentar a atração e retenção das partículas dos aerossóis. O aumento da eficiência devido à carga elétrica significa que um filtro eletrostático geralmente oferece menor resistência à respiração que um filtro mecânico que possua a mesma eficiência inicial. Isso ocorre porque um número menor de fibra é necessário para que um filtro

eletrostático atinja o mesmo nível de eficiência de um filtro mecânico. Dependendo de suas características, alguns aerossóis podem provocar degradação da carga eletrostática do filtro, causando queda acentuada em sua eficiência. Os filtros mecânicos são geralmente mais resistentes a esse tipo de degradação. (BARRETT; ROUSSEAU, 1998)

4.2.3 Filtros eletrostáticos

Existem várias tecnologias que permitem carregar o filtro com carga eletrostática. Alguns filtros são carregados com cargas triboelétricas. Essa tecnologia consiste em preparar uma mistura de fibras que possuam grandes diferenças de potencial triboelétrico. As fibras passam por um processo de esfregação de tal forma que o aparecimento de cargas triboelétricas é intensificado. Esses filtros, muitas vezes chamados de feltros, são normalmente mais grossos e possuem alta perda de carga, quando comparados com filtros de fibra de vidro ou fibras sintéticas. Essas fibras permitem o uso de tecnologia mais moderna para produzir cargas eletrostáticas em suas superfícies e essas tecnologias permitem a fabricação de filtros mais finos, com menor área superficial e baixa resistência à passagem do ar. Para todos os filtros usados para capturar particulados presentes no ar existe um tamanho de partículas para o qual o filtro é menos eficiente. Partículas com essas dimensões são referenciadas como Tamanho de Partículas Mais Penetrantes (MPPS). A existência do MPPS é um fenômeno reconhecido há vários anos. Hinds (1982) apresenta referências importantes para entendimento desse fenômeno. O MPPS não é o mesmo para todos os filtros, nem para o mesmo filtro se testado em condições diferentes. Ele é definido por um balanço de forças físicas, as quais dependem do desenho do filtro e da maneira como ele é testado. O MPPS tipicamente está situado entre 0,05 e 0,5 μm . (HINDS, 1982 p.179)

Vários estudos foram realizados para entender a importância da carga eletrostática no processo de captura de particulados.

Estudo realizado por Chen et al (2006) com aerossol de cloreto de sódio de dimensões entre 4,5 nm a 10 μm , em filtros para particulados com e sem carga eletrostática, demonstrou que a carga eletrostática exerce importante função no desempenho dos filtros para retenção de particulados com dimensões entre 10 nm

e 5 μm . Estudo similar, realizado por Martin e Moyer (2000), utilizou cloreto de sódio e DOP como agentes de testes. Os filtros usados nesse estudo enquadravam-se nas categorias N, R e P de aprovação de filtros para particulados definidos pela norma 42 CFR 84 (Estados Unidos, 1995) adotada pelo NIOSH – National Institute for Occupational Safety and Health nos Estados Unidos². Os dois estudos demonstraram que esses filtros são altamente dependentes de carga eletrostática. Sua eficiência cai dramaticamente quando são tratados com álcool isopropílico (também conhecido por isopropanol). Filtros de todas as classes tiveram seu desempenho muito afetado após o tratamento para redução ou eliminação da carga eletrostática. A perda de eficiência do filtro ocorreu principalmente na faixa compreendida entre 0,05 μm a 0,4 μm .

Existe uma grande preocupação com o fato de que, durante o uso, os filtros possam perder a força eletrostática e com isso perder parte de sua eficiência. Essa preocupação tornou-se ainda mais importante com a disseminação do uso de fibras sintéticas à base de plásticos poliolefínicos para fabricação desses filtros. Essas fibras plásticas possuem características oleofílicas, ou seja, grande afinidade com substâncias oleosas. Quando retidas na superfície da fibra, substâncias oleosas tendem a se espalhar sobre ela. Dessa forma, podem prejudicar a ação da carga eletrostática.

Janssen et al (2003) realizaram dois estudos com filtros eletrostáticos e mecânicos, utilizados em respiradores para particulados de dois fabricantes diferentes. Os filtros foram divididos em três grupos, o primeiro foi mantido conforme retirado da embalagem, o segundo grupo foi mergulhado em isopropanol e o terceiro grupo foi exposto à radiação ionizante de raios-X. Tanto o isopropanol como a radiação ionizante são reconhecidos degradantes da carga eletrostática acumulada. Foram utilizados filtros das classes N, R e P, conforme classificação definida pela 42 CFR 84 (Estados Unidos, 1995). Os filtros foram testados antes e após terem passado pelos tratamentos de degradação. Filtros novos e filtros degradados com isopropanol e raios-X foram expostos em ambientes reais de fundição de aço, a particulados sólidos e oleosos, por um período de 30 a 60 minutos, em condições de alta concentração desses particulados e com um fluxo de 27 litros por minuto passando através do filtro. Após essa exposição real, os filtros foram novamente

² O capítulo 5.1 discute a norma 42 CFR 84, que inclui classes de filtros e métodos de testes. Para os significados de N, R e P ver tabela 5.1 p.33.

testados segundo procedimentos especificados na norma 42 CFR 84 (Estados Unidos, 1995). No segundo estudo, as concentrações de ferro e óleo foram monitoradas antes e após a passagem pelos filtros, durante a exposição aos particulados da fundição. O aumento nos valores de penetração foi observado em todas as amostras, após os tratamentos de degradação. Esse aumento foi perceptível até mesmo no filtro mecânico P100, utilizado no estudo. Segundo o autor, não há registro anterior a esse estudo sobre aumento de penetração em filtros mecânicos que passam por tratamento para degradação de cargas eletrostáticas. Uma possível explicação para esse fato seria que, mesmo em filtros mecânicos, existe carga eletrostática, ainda que fraca, atuando para aumento de sua eficiência. Após a exposição ao ambiente real tanto a particulado sólidos como a aerossol oleoso, nenhum aumento de penetração foi percebido. Os valores de penetração de aerossol de ferro e óleo em ambiente real de fundição estavam abaixo de 1%, exceto para uma amostra de filtro N95, após tratamento de degradação com isopropanol.

4.2.4 Avaliação de desempenho de filtros para particulados

Os parâmetros que definem as condições de ensaios de um produto qualquer estão muitas vezes relacionados ao desempenho do produto em termos de tecnologia, e não em sua aplicação. No caso de filtros para particulados utilizados em equipamentos de proteção respiratória, a preocupação sempre foi em submeter o produto a uma condição de ensaio sob a qual se sabe que os filtros teriam dificuldades em passar. Um exemplo prático dessa visão é o uso de partículas oleosas para ensaios de filtros de respiradores. Partículas oleosas possuem uma grande afinidade com a maioria dos plásticos utilizados na fabricação dos filtros constituídos por micro-fibras sintéticas. Isto faz com que essas fibras percam mais rapidamente a carga eletrostática ao longo do tempo de exposição a essas substâncias, comparativamente à exposição a substâncias não-oleosas. Os particulados gerados na combustão incompleta de diesel, como os encontrados na mineração, possuem essas características. Dependendo da concentração desse aerossol no ambiente, isso pode se constituir um problema à vida útil do filtro.

Os filtros para particulados são classificados de acordo com o seu desempenho, em ensaios de laboratório realizados em condições definidas em várias normas internacionais. Diversos fatores influenciam no desempenho dos filtros nesses ensaios, entre eles estão: as características químicas do aerossol, o fluxo de ar contendo o aerossol que passa pelo filtro, a concentração e as dimensões das partículas do aerossol utilizado. A classificação do filtro de acordo com a NBR 13697 (ABNT, 1996) é dada pela percentagem de penetração do aerossol através do filtro. Portanto, quanto maior a penetração, menor é a eficiência do filtro.

4.2.4.1 Penetração e eficiência

A penetração ou a eficiência são parâmetros por meio dos quais se define o desempenho de um filtro na captura das partículas suspensas no ar. A penetração consiste na relação percentual entre a concentração do aerossol de ensaio, medida na saída e na entrada de um filtro para particulados, ensaiado em condições especificadas. A eficiência é a redução percentual da concentração em relação à entrada.

Se C_e é a concentração das partículas no ar na entrada do filtro e C_s a concentração na saída, definem-se a percentagem de penetração (P%) das partículas no filtro e a eficiência expressa em percentagem (E%) do filtro pelas equações:

$$P(\%) = \frac{C_s}{C_e} \times 100 \quad (4.3)$$

$$E(\%) = \frac{C_e - C_s}{C_e} \times 100 \quad (4.4)$$

Onde:

C_s é a concentração do aerossol após o filtro,

C_e é a concentração do aerossol antes de passar pelo filtro.

A relação entre a eficiência e a penetração é:

$$E(\%) = 100 - P(\%) \quad (4.5)$$

Assim, por exemplo, se em um ensaio de laboratório o filtro apresentou penetração de 10%, significa que 10% da massa de partículas que chegou, passou pelo filtro, ou seja, houve uma retenção de 90%. Portanto, a eficiência é de 90%.

As normas brasileiras de filtros para particulados, bem como as da união européia, valem-se do conceito de penetração, enquanto as norte-americanas empregam o de eficiência.

A medida da penetração deve ser feita com aerossol formado por partículas com dimensão da “fração respirável”, isto é, menores que 5 μm . A maior parte das partículas com tais dimensões atinge a região alveolar. Por isso, os filtros devem ser avaliados segundo a capacidade de deixá-las passar ou não. Como a penetração das partículas de um aerossol é máxima quando o seu tamanho é de aproximadamente 0,2 μm (HINDS, 1982, p.179,), a medida deve ser efetuada com partículas cujo diâmetro médio seja próximo desse valor e, assim, satisfazer ao mesmo tempo esses dois requisitos: ter tanto as dimensões de partícula respirável como as da partícula com maior poder de penetração. Como alguns contaminantes, como as névoas contendo óleos, podem anular as cargas elétricas de alguns tipos de fibras utilizadas nos filtros, provocando aumento da penetração, eles também devem ser ensaiados com partículas oleosas. É por essa razão que a NBR 13697 (ABNT, 1996) define a classe de um filtro para particulados por meio da realização de ensaios com o aerossol de cloreto de sódio como representante das partículas sólidas e o aerossol de óleo de parafina como representante das partículas líquidas oleosas. A resistência é medida, com o emprego de filtros novos, com fluxo contínuo de ar em duas vazões: 30 l/min e 95 l/min correspondentes, respectivamente, a um trabalho normal e a um pesado. Essa norma brasileira foi baseada na versão de 1991 da norma EN 143 (CEN, 2006). Tanto a norma brasileira como européia fazem referência ao uso de um detector de cloreto de sódio do tipo ionização de chama. Nos Estados Unidos e Canadá, a penetração através do filtro é medida durante o carregamento do filtro com 200 mg de aerossol de teste. Utilizam cloreto de sódio e DOP – ftalato de di(etil-hexila) como agentes de ensaios. A vazão do fluxo de aerossol durante o ensaio deve ser mantida em 85 l/min. As medições de concentração antes e após o filtro são medidas por fotometria de dispersão de luz.

5 NORMAS DE TESTES DE FILTROS PARA PARTICULADOS

Neste capítulo serão apresentados três métodos de medida da eficiência de filtros para particulados. O método empregado nos Estados Unidos conforme descrito no Code of Federal Regulation – 42 CFR 84 (Estados Unidos, 1995); o estabelecido no Brasil e descrito na norma brasileira NBR 13697 (ABNT, 1996); e a norma européia EN 143 (CEN, 2006), a qual foi acrescida das emendas A1 em Junho de 2006. A norma brasileira NBR 13697 (ABNT, 1996) foi baseada na versão original, de 1991, da EN143 (CEN, 2006).

5.1 APROVAÇÃO DE FILTROS PARA PARTICULADOS SEGUNDO A 42 CFR 84

Até 1972, o Bureau of Mines (USBM) Norte Americano era o único responsável por testar e aprovar respiradores nos Estados Unidos da América (EUA). Em 1972, o USBM e o National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) publicaram conjuntamente o documento 30 CFR 11 (Estados Unidos, 1978 A), o qual substituiu as regras e procedimentos do USBM e delineou as responsabilidades das duas agências. De acordo com esse regulamento, o USBM avaliava o desempenho dos respiradores e o NIOSH era responsável pelo controle de qualidade. Em 1978, data de sua criação, o Mine Safety Health Administration (MSHA) tomou as responsabilidades pela realização dos testes e aprovação para alguns tipos de equipamentos de proteção respiratória, mas testes e aprovações especificadas no documento 30 CFR 11 (Estados Unidos, 1978 A) continuaram a ser conduzidas prioritariamente pelo NIOSH. Em Junho de 1995 o MSHA removeu do regulamento 30 CFR 11 (Estados Unidos, 1978 A) o tema de filtros para particulados e no mesmo ano o NIOSH o substituiu por um novo regulamento denominado 42 CFR 84 (Estados Unidos, 1995). Esse documento se tornou efetivo em 10 de Julho de 1995. Com essa modificação, o NIOSH elevou os níveis de

eficiência dos filtros nos testes para filtros para particulados. (ESTADOS UNIDOS, 1995)

5.1.1 Classificação dos filtros

No regulamento 30 CFR 11 (Estados Unidos, 1978 A), os filtros são classificados em DM (Dust/Mist), DMF (Dust/Mist/Fumes) e HE (High Efficiency). As siglas DM, DMF e HE indicam o uso a que tais filtros se destinam, sendo DM para poeiras e névoas; DMF para poeiras, névoas e fumos; e HE destinado à proteção contra particulados altamente tóxicos.

Por outro lado, as classificações definidas no regulamento 42 CFR 84 (Estados Unidos, 1995) indicam a capacidade e a eficiência do filtro para retenção de partículas oleosas e não-oleosas. Os filtros são divididos em três tipos:

- ✓ Tipo N (Not resistant to oil) – Aprovado para uso contra aerossóis que não contenham particulados oleosos (poeiras, fumos, e névoas que não contenham substâncias oleosas).
- ✓ Tipo R (Resistent to oil) – Aprovado para uso contra todos os tipos de aerossóis, porém com restrições no tempo de uso para partículas oleosas (exemplo: 8 horas).
- ✓ Tipo P (Proof to oil) – Aprovado para uso contra todos os tipos de aerossóis (poeiras, fumos e névoas, incluindo névoas contendo substâncias oleosas), sem tempo de uso definido.

Os filtros de cada tipo são divididos em três níveis de eficiência: 95%, 99% e 99,97%. Considerando o tipo e o nível de eficiência, resultam 9 classes de filtros para particulados, conforme tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Classificação de filtros para particulados segundo a norma 42 CFR 84 (Estados Unidos 1995).

42 CFR 84	Aerossol de teste utilizado para classificação		
	NaCl	DOP	DOP
Eficiência mínima	Para substâncias não oleosas	Inclui aerossóis oleosos *	Inclui aerossóis oleosos
95 %	N 95	R 95	P 95
99 %	N 99	R 99	P 99
100 %	N 100	R 100	P 100

* Pode haver restrição de tempo de uso, se houver presença de aerossol oleoso.

5.1.2 Métodos de ensaio de penetração através do filtro

5.1.2.1 Pré-condicionamento

Antes do teste, 20 amostras devem ser retiradas da embalagem e colocadas em um ambiente com $(85 \pm 5) \%$ de umidade relativa a $(38 \pm 2,5) ^\circ\text{C}$ por (25 ± 1) hora. Após o pré-condicionamento, é requerido que os filtros sejam submetidos aos ensaios de penetração e resistência à respiração em um período não superior a 10 horas.

5.1.2.2 Aerossóis de teste

Os filtros são testados com aerossol de partículas sólidas de cloreto de sódio (filtros das classes N), ou DOP (filtros das classes R e P), a temperatura de $(25 \pm 5) ^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $(30 \pm 10) \%$. O fluxo do aerossol de teste através do filtro deve ser contínuo de (85 ± 4) litros por minuto para filtros utilizados em respiradores que usam apenas um filtro, e metade deste valor para filtros utilizados aos pares. Os particulados do aerossol gerado em nebulizador devem ser neutralizados para o estado de equilíbrio de Boltzmann.

É requerido que as partículas do aerossol de cloreto de sódio tenham um diâmetro médio por contagem de 0,075 a 0,020 μm e desvio padrão geométrico não superior a 1,86; e as partículas líquidas oleosas de DOP tenham uma distribuição de diâmetro médio por contagem entre 0,185 e 0,020 e um desvio padrão geométrico não superior a 1,60.

5.1.2.2.1 Sistema de detecção

A eficiência do filtro (i.e. a quantidade de partículas de aerossol que passa através do filtro) deve ser monitorada e registrada durante todo o período de teste, por um fotômetro de dispersão de luz apropriado ou por outro instrumento de detecção equivalente.

5.1.2.2.2 Procedimento de teste

Os filtros da classe N são testados com aerossol de cloreto de sódio e os filtros das classes R e P são testados com aerossol de DOP. A eficiência do filtro deve ser monitorada e registrada durante o período de teste. O teste deve continuar até que a mínima eficiência do filtro seja detectada ou até que uma massa de aerossol mínima de (200 ± 5) mg tenha contactado o filtro. Para os filtros da classe P, se a eficiência do filtro estiver decrescendo no ponto em que (200 ± 5) mg tenha sido atingido, o teste deverá ser continuado até que não haja mais decréscimo no valor da eficiência. As medidas das concentrações de partículas antes e após cada uma das 20 amostras submetidas ao teste devem apresentar uma eficiência mínima igual ou superior a 95 % para classificar-se como N95; 99 % para classificar-se como N99 e 99,97 % para classificar-se como N 100. Para serem classificados nas classes R e P os filtros são testados com DOP e devem ter desempenhos equivalentes aos valores acima mencionados para as classes N.

5.2 APROVAÇÃO DOS FILTROS PARA PARTICULADOS SEGUNDO A NORMA EN 143 (CEN, 2006)

Na comunidade europeia existem duas normas que estabelecem requisitos de desempenho para aprovação de filtros para uso contra particulados. Os parâmetros definidos na norma EN 143 (CEN, 2006) são para filtros a serem utilizados em respirador de filtros cambiáveis. Este tipo de respirador é constituído por uma peça facial ou semifacial, usualmente de elastômero, com conexões para colocação de um ou mais filtros. Permite o uso de filtros para gases e vapores, filtros para particulados, ou combinações dos dois. A segunda norma é a EN 149 (CEN, 2001), que estabelece requisitos para aprovação de filtros para particulados incorporados em respirador do tipo peça semifacial filtrante. Os equipamentos do tipo peça semifacial filtrante (PFF) são equipamentos constituídos total ou parcialmente pelo meio de filtração. Os filtros são incorporados no próprio equipamento de proteção respiratória e não podem ser separados desse. Apesar de terem requisitos de desempenho diferentes, os parâmetros de testes de filtros para particulados são os mesmos para os filtros cambiáveis e filtros incorporados nas PFFs.

A norma EN 143 (CEN, 2006) incorpora correções de julho de 2002, março de 2005 e emendas A1 de junho de 2006, difere significativamente do texto original, no qual foi baseado a norma brasileira NBR 13697 (ABNT, 1996), apresentada no capítulo 4.5.3.

5.2.1 Classificação dos filtros

As classificações dos filtros para particulados são diferentes nas normas EN 143 (CEN, 2006) e EN 149 (CEN, 2001). Na EN 143 (CEN, 2006) são classificados como: P1, P2 e P3. Na EN 149 (CEN, 2001) são classificados em: FFP-1, FFP-2 e FFP-3. Os filtros são também classificados de acordo com o uso destinado: para um único turno de trabalho ou reutilizado em mais de um turno. Para os filtros utilizados por mais de um turno de trabalho, é exigido que sejam re-testados após

um período de estocagem, e atendam os mesmos requisitos de eficiência estabelecidos no primeiro teste, conforme tabelas 5.2 e 5.3.

Tabela 5.2 – Requisitos para aprovação de filtros para particulados de acordo com a norma europeia EN 143 (CEN, 2006)

Classe do filtro	Penetração máxima do aerossol de ensaio (%)	
	Ensaio de cloreto de sódio	Ensaio de óleo de parafina
	95 L/min ^(A)	95 L/min ^(A)
P1	20	20
P2	6	6
P3	0,05	0,05

(A): Fluxo de ar contínuo.

Tabela 5.3 – Requisitos para aprovação de filtros para particulados de acordo com a norma europeia EN 149 (CEN, 2001)

Tipo/Classe	Penetração máxima do aerossol de ensaio	
	Cloreto de sódio	Óleo de parafina
	95 L/min ^(A)	95 L/min ^(A)
FFP-1	20 %	-
FFP-2	6 %	2 %
FFP-3	3 %	1 %

(A): Fluxo de ar contínuo.

5.2.2 Ensaio de penetração através dos filtros para particulados

Os métodos de ensaios para os filtros P1, P2, P3, FFP-1, FFP-2 e FFP-3 são iguais e estão definidos na norma EN 143 (CEN, 2006). Antes da realização do ensaio é requerido que os filtros passem por dois processos de pré-condicionamento: resistência mecânica e temperatura.

5.2.2.1 Pré-condicionamento

Antes dos testes de penetração, os filtros devem ser submetidos a dois ensaios de pré-condicionamento: resistência mecânica e condicionamento a temperatura.

5.2.2.1.1 Pré-condicionamento de resistência mecânica

O teste é realizado em um equipamento constituído por uma caixa fixada em um pistão, movimentado por um eixo excêntrico. Os filtros são colocados em compartimentos separados, em posição vertical, dentro da caixa. O movimento do eixo excêntrico faz com que a caixa tenha um deslocamento horizontal de 6 mm e vertical de 20 mm, seguido de queda livre. A duração do teste é de 20 minutos. O eixo tem uma rotação de 100 giros por minuto, perfazendo um total de 2000 quedas da caixa durante o período de teste. Após o pré-condicionamento, o filtro não deve apresentar defeitos mecânicos e satisfazer os requisitos de penetração.

5.2.2.1.2 Pré-condicionamento de temperatura

Os filtros mantidos dentro de suas embalagens são submetidos ao seguinte ciclo de variação de temperatura:

- a) temperatura seca de $(70 \pm 3) ^\circ\text{C}$ por 24 horas;
- b) temperatura de $(-30 \pm 3) ^\circ\text{C}$ por 24 horas.

Os filtros devem permanecer um tempo mínimo de 4 horas em temperatura ambiente, antes de serem submetidos aos testes de penetração e resistência a respiração com o intuito de evitar choques térmicos.

5.2.2.2 Aerossóis de teste

5.2.2.2.1 Cloreto de sódio

Aerossol é gerado em um atomizador tipo Collision³ a partir de uma solução de 1% de cloreto de sódio em água. O aerossol produzido por este método é polidisperso

³ Um desenho do nebulizador tipo Collision pode ser visto no capítulo 6, página 53, figura 6.5.

com um diâmetro médio mássico das partículas de aproximadamente 0,6 μm com distribuição de tamanho de partículas conforme mostra a figura 4.6.

5.2.2.2.2 Óleo de parafina

O aerossol é gerado em um vaso atomizador eletricamente aquecido. A temperatura nominal do óleo é mantida a 100 °C por meio de um termostato. O aerossol produzido é polidisperso e a distribuição logarítmica normal dos tamanhos das partículas por contagem possui diâmetro médio de 0,4 μm e desvio padrão de 0,26.

5.2.2.3 Procedimentos de teste

A câmara de teste é alimentada com o aerossol onde o filtro a ser testado é fixado. Um fluxo de 95 litros por minuto é passado através do filtro, e a concentração do aerossol é medida antes e após o filtro, por fotometria.

O valor de penetração é registrado durante o teste a intervalos de tempo não superiores a 5 minutos.

- Nos ensaios com óleo de parafina, deve-se continuar o teste até que o filtro tenha sido exposto a 120 mg do aerossol.
- Nos testes com aerossol de cloreto de sódio, deve-se continuar o teste até que o filtro tenha sido exposto a 120 mg de aerossol, a menos que:
 - a) em filtros aprovados para uso por um único turno de trabalho, os valores de penetração demonstrem estar em declínio por 5 minutos ou 5 intervalos de amostragem, valor que for maior.
 - b) em filtros aprovados para uso por mais de um turno de trabalho, os valores de penetração demonstrem estar em declínio por 5 minutos ou 5 intervalos de amostragem, valor que for maior, e os valores penetração máxima com aerossol de cloreto de sódio têm que ser inferiores aos resultados dos testes com óleo de parafina.

5.3 APROVAÇÃO DE FILTROS PARA PARTICULADOS SEGUNDO NBR 13697 (ABNT, 1996 A) E 13698 (ABNT, 1996 B)

Essas normas foram escritas por uma comissão de estudos da ABNT, formada por profissionais ligados à área de proteção respiratória representando o governo, usuários de respiradores, fabricantes e outros interessados, a qual iniciou seus trabalhos no CB-2 – Comitê Brasileiro da Construção Civil, no ano de 1989. Em 1996, com a criação do CB-32 – Comitê Brasileiro de Equipamentos de Proteção Individual, cujo escopo de trabalho abrange todos os EPIs, a comissão de estudos para proteção respiratória integrou-se a esse comitê. Neste mesmo ano, 1996, foram publicadas as duas normas que tratam de requisitos e procedimentos de ensaios para aprovação de filtros para particulados, a NBR 13697 (ABNT, 1996) Equipamentos de proteção respiratória – Filtros mecânicos e a NBR 13698 (ABNT, 1996) Equipamentos de proteção respiratória – Peças semifaciais filtrantes para particulados.

A norma brasileira NBR 13697 (ABNT, 1996) fixa as condições exigíveis para filtros mecânicos para uso como parte de um equipamento de proteção respiratória, excluídos os respiradores de fuga e as peças semifaciais filtrantes. Essas últimas, também conhecidas como máscaras descartáveis, são tratadas na norma NBR 13698 (ABNT, 1996).

5.3.1 Classificação dos filtros

De acordo com a NBR 13697 (ABNT, 1996 A), os filtros para particulados são divididos em três classes P1, P2 e P3. Os filtros P1 são indicados somente para partículas sólidas. Os de classe P2 e P3 são subdivididos de acordo com sua capacidade de remover partículas sólidas e líquidas (SL, aprovados nos ensaios com aerossol de cloreto de sódio e de óleo de parafina), ou somente sólidas (S, aprovados no ensaio de cloreto de sódio). Os requisitos para resistência máxima à

respiração e penetração constantes da NBR 13697 (ABNT, 1996) estão nas tabelas apresentadas na figura 5.4.

Tabela 5.4 – Requisitos para aprovação de filtros para particulados de acordo com a norma NBR 13697 (ABNT, 1996 A)

Classe do filtro	Penetração máxima do aerossol de ensaio (%)	
	Ensaio de cloreto de sódio 95 L/min ^(A)	Ensaio de óleo de parafina 95 L/min ^(A)
P1	20	20
P2	6	6
P3	0,05	0,05

(A): Fluxo de ar contínuo.

De acordo com a NBR 13698 (ABNT, 1996 B), as Peças Faciais Filtrantes (PFFs), equipamento de proteção respiratória constituído inteiramente ou parcialmente pelo meio de filtração, são classificadas em PFF1, PFF2 e PFF3. Analogamente a classificação dos filtros mecânicos, a PFF também é subdividida de acordo com sua capacidade de remover partículas sólidas e líquidas (SL, aprovadas nos ensaios com aerossol de cloreto de sódio e de óleo de parafina), ou somente sólidas (S, aprovadas no ensaio de cloreto de sódio). Os requisitos para resistência máxima à respiração e penetração constantes da NBR 13698 (ABNT, 1996) estão na tabela apresentada na figura 5.5 abaixo.

Tabela 5.5 – Requisitos para aprovação de filtros para particulados de acordo com a norma NBR 13698 (ABNT, 1996 B).

Tipo/Classe	Penetração máxima do aerossol de ensaio	
	Cloreto de sódio 95 L/min ^(A)	Óleo de parafina 95 L/min ^(A)
FFP-1	20 %	-
FFP-2	6 %	2 %
FFP-3	3 %	1 %

(A): Fluxo de ar contínuo.

5.3.2 Método de testes

Os métodos de testes dos filtros para particulados utilizados em respiradores de filtros cambiáveis e nas PFFs são iguais aos descritos na NBR 13697 (ABNT, 1996 A). No texto abaixo é apresentado um resumo desses métodos.

5.3.2.1 Pré-condicionamento de vibração

O teste é realizado em um equipamento constituído por uma caixa fixada em um pistão com movimentos verticais que provocam uma queda de 10 mm na caixa. Cada filtro, separadamente, é colocado nesta caixa e sofre cerca de 2000 quedas contínuas por um período de 20 minutos. Após o pré-condicionamento, o filtro não deve apresentar defeitos mecânicos e satisfazer aos requisitos de resistência à respiração e penetração.

5.3.2.2 Ensaio do cloreto de sódio

5.3.2.2.1 Princípio do método

O teste está descrito para uso do equipamento Moore's. O aerossol é gerado por um nebulizador tipo Collision⁴, alimentado com uma solução de 1% de cloreto de sódio. O diâmetro médio mássico do aerossol é de 0,6 μm , tipo polidisperso com distribuição de tamanho de partículas conforme curva mostrada na figura 5.1. O gráfico mostra a distribuição tanto em massa das partículas (primeira curva), como em número de partículas (segunda curva). Os valores indicados no eixo das abcissas referem-se a percentagem de partículas menores que o valor indicado. Os valores indicados no eixo das ordenadas indicam as dimensões da diagonal maior da partícula de cloreto de sódio. Se selecionar 50 % no eixo das abcissas, subindo até a primeira curva (Massa) encontra-se o valor de 0,6 μm para tamanho de partícula. Isto significa que 50% das partículas geradas pelo atomizador estão acima de 0,6 μm e 50% das partículas tem seus valores da maior diagonal

⁴ Um desenho do nebulizador tipo "Collision" pode ser visto no capítulo 6, página 53, figura 6.5.

menores que $0,6 \mu\text{m}$ em massa de particulados. Seguindo o mesmo raciocínio, e partindo do 50% até encontrar a segunda curva (Número), chega-se a $0,06 \mu\text{m}$. Isto significa que 50% das partículas de cloreto de sódio geradas no atomizador possuem valores da maior diagonal maiores que $0,06 \mu\text{m}$ e 50% menores que este valor. A concentração do aerossol que entra na câmara de ensaio é de $(8 \pm 4) \text{ mg/m}^3$. As partículas de cloreto de sódio suspensas no ar são vaporizadas ao passarem pela chama, dando a emissão característica de sódio: 589 nm. A intensidade desta emissão é proporcional à concentração de sódio na corrente de ar.

5.3.2.2.2 Procedimentos de teste

A vazão através do filtro é contínua de 95 l/min e a concentração do aerossol medida nos primeiros segundos pelo fotômetro, imediatamente antes e depois do filtro. São possíveis determinações precisas de penetração na faixa de 0,0001% a 100%.

5.3.2.3 **Ensaio do óleo de parafina**

5.3.2.3.1 Princípio do método

Um aerossol de gotas de parafina é gerado por nebulização de óleo de parafina aquecido com diâmetro médio de $0,4 \mu\text{m}$, por contagem de número de partículas, e desvio padrão logarítmico de 0,26. A concentração deste aerossol é medida antes e depois do filtro em teste, por exemplo, por fotometria. São possíveis determinações precisas de penetração na faixa de 0,0003% a 100%.

5.3.2.3.2 Procedimentos de teste

Uma vazão de 95 l/min é estabelecida através do filtro, por meio de uma bomba de sucção. A concentração do aerossol na câmara de ensaio é de $(20 \pm 5) \text{ mg/m}^3$ e é medida imediatamente antes e depois do filtro.

Figura 5.1 – Figura ilustrativa e gráfico mostrando curva de distribuição de tamanho de partículas utilizadas nos ensaios de cloreto de sódio das normas EN 143 (CEN, 2006) e NBR 13697. Fonte adaptado de NBR 13697 (ABNT, 1996).

5.4 COMPARAÇÕES E DISCUSSÕES SOBRE AS NORMAS APRESENTADAS

As tabelas 5.6 a 5.8 foram construídas com o objetivo de facilitar comparações entre as normas de ensaios de filtros para particulados pesquisadas. Na tabela 5.6 foram colocados os requisitos para aprovação dos filtros e nas tabelas 5.7 e 5.8, os principais parâmetros de ensaios, agrupados em requisitos gerais e requisitos relativos à geração do aerossol.

Tabela 5.6 – Classificações dos filtros para particulados

Classes de filtros	42 CFR 84		EN 143/149		NBR 13697/ 13698	
	Não oleosas	Oleosas	Não oleosas	Oleosas	Não Oleosas	Oleosas
Baixa eficiência	N95	R95/P95	P1/FFP1	P1/FFP1 S/L	P1/PFF1	
Média Eficiência	N99	R99/P99	P2/FFP2	P2/FFP2 S/L	P2/PFF2	P2/PFF2 S/L
Alta Eficiência	N100	R100/P100	P3/FFP3	P3FFP3 S/L	P3/PFF3	P3/PFF3 S/L

Tabela 5.7 – Parâmetros gerais para realização de ensaios de filtros para particulados

Parâmetros	42 CFR 84	EN 143	NBR 13697
Número de amostras	20	Indefinido	10
Pré-condicionamento	Umidade e temperatura	Vibração e temperatura	Vibração
Fluxo (l/min)	85 ± 4	95	95
Temperatura	25 ± 5 °C	Ambiente	Ambiente
Umidade Relativa	30 ± 10	Menor que 60 %	Menor que 60 %

Tabela 5.8 – Parâmetros relativos à geração e detecção do aerossol.

Parâmetros	42 CFR 84	EN 143	NBR 13697
Neutralização do aerossol	Neutralizado de acordo com o estado de equilíbrio de Boltzmann	Não exige neutralização de cargas eletrostáticas do aerossol	Não exige neutralização de cargas eletrostáticas do aerossol
Tamanho de partículas de NaCl (μm)	$0,075 \pm 0,020$ $\text{GSd} \leq 1,86$ (Número de partículas)	Médio = 0,6 (Massa de partículas) ou 0,06 (Número de partículas) (Ver figura 5.1)	Médio = 0,6 (Massa de partículas) ou 0,06 (Número de partículas) (Ver figura 5.1)
Tamanho de partículas oleosas (μm)	DOP $0,185 \pm 0,020$ $\text{GSd} \leq 1,60$ (Número de partículas)	Óleo de Parafina 0,4 $\sigma_{\log d} = 0,26$ (Número de partículas)	Óleo de Parafina 0,4 $\sigma_{\log d} = 0,26$ (Número de partículas)
Concentração do aerossol de ensaio	Menor que 200 mg/m^3 para NaCl e DOP	$(8 \pm 4) \text{mg}/\text{m}^3$ NaCl e $(20 \pm 5) \text{mg}/\text{m}^3$ óleo de parafina	$(8 \pm 4) \text{mg}/\text{m}^3$ NaCl e $(20 \pm 5) \text{mg}/\text{m}^3$ óleo de parafina
Duração do ensaio	Até Mínima eficiência ou 200 mg de aerossol tenha contatado o filtro.	Até que 120 mg de aerossol tenha contatado o filtro ou valores de penetração em declínio.	Leitura deve ser realizada em tempo máximo de 1 minuto
Detector	Fotômetro de dispersão de luz ou equivalente	Fotometria de chama	Fotometria de luz (Fotômetro de chama é sugerido)

As características químicas e físicas dos aerossóis de testes especificados nas três normas de ensaio de filtros para particulados 42 CFR 84 (Estados Unidos, 1995), EN 143 (CEN, 2006) e NBR 13697 (ABNT, 1996) analisadas são muito parecidas entre si. As três normas requerem o uso de aerossóis polidispersos de cloreto de sódio e de substância oleosa, ambos com dimensões consideradas mais penetrantes, tamanho médio por número de partículas variando entre 0,2 e 04 μm

para substâncias oleosas e 0,02 a 0,06 para cloreto de sódio. A dispersão de tamanhos de partículas também está especificada dentro de limites rígidos, nas três normas.

As normas 42 CFR 84 (Estados Unidos, 1995) e EN 143 (CEN, 2006) estabelecem que as medições de valores de penetração sejam feitas de forma contínua até que quantidades definidas de aerossol tenham contatado o filtro. Fazem concessões nos casos em que os filtros demonstrem aumento de eficiência ou declínio nos valores de penetração durante tempos especificados. A norma NBR 13697 (ABNT, 1996) não requer que o filtro seja submetido a essa condição de carregamento durante o ensaio. Essa é uma diferenciação importante da norma brasileira em relação às outras duas normas, a qual pode facilitar a aprovação de filtros sujeitos à degradação precoce por ação do aerossol de teste. Filtros não resistentes ao ensaio de degradação por carregamento podem falhar durante o uso, em atmosferas industriais contaminadas com aerossóis oleosos ou outros materiais que impactem o desempenho da carga eletrostática do filtro.

Tendo em vista que as normas NBR 13697 (ABNT, 1996) e 13698 (ABNT, 1996) foram escritas com base nas versões de 1991 das normas européias EN 143 (CEN, 2006) e EN 149 (CEN, 2001) deveriam apresentar tanto requisitos para aprovação, como metodologia de ensaio de filtros muito semelhantes. Essa expectativa confirma-se em parte, pois, apesar de terem sido mantidos inalterados os requisitos para aprovação, os procedimentos de teste foram alterados na edição 2006 da EN 143 (CEN, 2006), e as medições de penetração são realizadas continuamente durante o ensaio até que 120 mg de aerossol tenham contatado o filtro, de maneira parecida à descrição da norma 42 CFR 84 (Estados Unidos, 1995). Essa mudança de procedimento submete o filtro às condições descritas no parágrafo anterior.

6 EQUIPAMENTOS DE TESTES DE FILTROS P/ PARTICULADOS

Neste capítulo estão descritos o funcionamento de dois equipamentos de testes utilizados no Brasil. O equipamento Moore's BS 4400 Tester Rig está capacitado para testes com cloreto de sódio apenas, enquanto que o equipamento da TSI AFT 8130/8127 pode realizar testes com aerossóis de cloreto de sódio e aerossóis oleosos. Como o objetivo deste trabalho é comparar métodos e testes realizados com esses dois equipamentos, as descrições abaixo limitaram-se a eles.

O princípio de funcionamento dos equipamentos de ensaios Moore's BS 4400 Tester Rig e TSI modelo AFT 8130 são muito parecidos, ambos geram um aerossol constituído por partículas sólidas de cloreto de sódio em condições bem definidas e fazem-nas passar através do filtro. A concentração de cloreto de sódio na atmosfera de ensaio é medida antes e depois de passar pelo filtro, por fotometria de chama (Moore's) ou por fotometria de dispersão de luz (TSI). Na fotometria de chama as medições das concentrações do aerossol, antes e depois do filtro, são feitas por emissão de luz das partículas de sódio volatilizadas no contato direto com a chama. Portanto, os valores de concentrações estão relacionados com a massa dessas partículas e não dependem do tamanho ou formato delas. Na fotometria por dispersão de luz, as medições são realizadas com base na dispersão de um feixe de luz laser que incide sobre as partículas contidas no aerossol de testes. Essa medição depende do tamanho e da forma das partículas em suspensão. Porém, nos dois casos o valor de penetração é obtido pela relação das duas concentrações de aerossol, antes e após a passagem pelo filtro em teste. Uma avaliação sobre a precisão e exatidão das duas técnicas não foi realizada neste estudo, porém o fato de que os resultados obtidos nos testes para particulados são de valores de penetração do aerossol através do filtro, resultados das relações de dois valores de concentração medidos sempre pela mesma técnica, a interferência da técnica de detecção utilizada fica diminuída no resultado final.

A penetração do aerossol através do filtro é função de três parâmetros de ensaio: tamanho médio das partículas, dispersão em torno da média e fluxo do aerossol que passa pelo filtro. Experimentos realizados nos laboratórios da 3M, nos Estados

Unidos demonstram graficamente estas relações. A figura 6.1 apresenta a relação de tamanho de partículas, fluxo de aerossol e valor de penetração esperado para um filtro típico. O efeito que a distribuição de tamanho de partículas exerce sobre o valor de penetração do aerossol é mostrado na figura 6.2. Ele mostra que esse valor decresce com o aumento do desvio padrão geométrico (GSD) do tamanho das partículas utilizadas no teste. Um aerossol é considerado polidisperso, quando o GSD é maior que 1,2.⁵

Figura 6.1 – Relação de penetração com diâmetro das partículas. Fonte: Cadalbert e Simpson, 2006.

⁵ Informações obtidas em apresentações não formais, internas, na empresa 3M Company.

Figura 6.2 – Relação entre Penetração e Desvio Padrão Geométrico. Fonte: Cadalbert e Simpson, 2006.

6.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO EQUIPAMENTO MOORE'S

A empresa Moore's foi produtora de equipamentos de teste que utilizam fotômetro de chama até o ano de 1998, quando decidiu concentrar seus esforços em suas atividades fins (componentes para a indústria aeroespacial). Com mais de 30 anos de experiência acumulada nesse tipo de equipamento, dois ex-funcionários da Moore's decidiram dar continuidade a essas atividades e juntos estabeleceram uma empresa chamada SPF Services na cidade de Chrischurch, Inglaterra. O equipamento de testes de filtros que utiliza fotometria de chama para detecção de cloreto de sódio, figura 6.3, é atualmente comercializado por essa empresa sob a referência Bench Mounting Rig type 1100. Uma referência anterior bastante comum para esse equipamento é BS 4400 Moore's Tester Rig. A sigla BS 4400 é uma referência à antiga norma de testes de filtros para particulados da British Standard Institute (BSI), BS 4400:1969 – Método de teste com cloreto de sódio para filtros

utilizados em respiradores. Essa norma foi substituída pela EN 143 (CEN, 2006) de 1991. O equipamento Moore's foi referência para ensaios de filtros para particulados durante muitos anos no Brasil e atualmente é utilizado para ensaios na Fundacentro. Nesta dissertação, deste capítulo em diante, o equipamento Bench Mounting Rig Type 1100 será referido apenas como Moore's.

Figura 6.3 – Fotografia de um equipamento Bench Mounting Rig type 1100 (atual referência do equipamento Moore's). Fonte: catálogo SPF Services.

6.1.1 Descrição do equipamento

Uma névoa é obtida continuamente pela nebulização da solução aquosa de cloreto de sódio a 1% em massa. O ar comprimido, limpo, utilizado na nebulização a uma vazão de 12,5 a 13 l/min, e mantido a uma pressão de 34,3 Pa. A névoa, formada por partículas líquidas da solução, passa por um tubo de secagem, onde se mistura com 72,5 l/min de ar limpo. Durante a passagem pelo tubo de secagem, as gotas evaporam, formando-se partículas cúbicas de cloreto de sódio, que, juntamente com o ar, constituem o aerossol de teste. O filtro é instalado na câmara de ensaio e uma válvula de duas vias direciona o aerossol de teste diretamente para o a chaminé ou para o filtro em teste. Quando a válvula está na posição “teste”, o aerossol passa pelo filtro e depois pela chaminé, por tiragem natural, sem exaustão forçada. Nessa chaminé, encontra-se a chama de hidrogênio, cuja luz emitida é medida por uma fonte fotomultiplicadora. Como essa fonte é sensível a uma larga faixa de comprimentos de onda, é usado um filtro de interferência que seleciona

somente as linhas de sódio. O instrumento deve ser calibrado de maneira a ter-se, na unidade de medida, o sinal correspondente à concentração do aerossol, sendo este último obtido em diferentes concentrações por sucessivas diluições efetuadas na unidade de diluição, a partir do aerossol produzido no nebulizador. O sinal varia linearmente com a concentração do sal no aerossol a intervalos entre 0 e 8%, aproximadamente, em relação à concentração do aerossol produzido no nebulizador. Acima desse valor, a correlação não mais apresenta comportamento linear. (TORLONI, 1985, p.3.2.-3.7). A figura 6.4 apresenta um esquema simplificado de funcionamento desse equipamento de ensaio.

Figura 6.4 – Esquema simplificado de funcionamento do equipamento Moore's. Fonte: NBR 13697 (ABNT, 1996).

6.1.2 Gerador de aerossol

O aerossol de cloreto de sódio é gerado por um nebulizador modelo "*Collision*", alimentado com solução de 1 % de cloreto de sódio em água. O nebulizador consiste-se em um reservatório de vidro e um cilindro com três bicos nebulizadores e é alimentado com ar à pressão de 345 kPa. A partícula umedecida choca-se com chicanas existentes no interior do reservatório para retenção das partículas grandes. As partículas menores saem do nebulizador e são misturadas com ar seco. A água é evaporada e a névoa de cloreto de sódio é formada. A névoa gerada por esse método é polidispersa com um diâmetro médio mássico de 0,6 μm . O Moore's atende a norma europeia EN 143 (CEN, 2006), portanto, a

distribuição de tamanho de partículas está em conformidade com o estabelecido nessa norma (ver capítulo 5.2). O ar que sai do interior do nebulizador é misturado com ar de diluição a uma vazão de 82 litros/minuto. A figura 6.5 mostra os principais componentes do gerador de aerossol tipo “Collision”. (CEN, 1996 A).

Figura 6.5 – Nebulizador modelo “Collision” utilizado no equipamento Moore’s. Fonte: NBR 13697 (ABNT, 1996)

6.1.3 Sistema de detecção

A concentração do aerossol de cloreto de sódio é medida antes e depois do filtro em teste, por um fotômetro de chama de hidrogênio. O local onde é queimado o hidrogênio é coberto por um tubo vertical, o qual inclui um tubo de amostragem (chaminé) por onde o aerossol a ser analisado é aspirado por tiragem natural. As partículas de cloreto de sódio em suspensão passam através da chama e são vaporizadas, emitindo uma onda de luz com 589 nm, característica do sódio. A intensidade dessa emissão é proporcional à concentração de sódio na corrente de ar e é medida em um tubo fotomultiplicador. O sinal gerado pelo fotomultiplicador é amplificado e indicado no painel de controle, ou registrado graficamente. O

fotômetro pode ser calibrado por diluição tanto da solução nebulizada como do aerossol gerado utilizado no teste. (CEN, 1996).

6.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO EQUIPAMENTO TSI AFT 8130

A TSI é uma empresa norte americana, situada em Shoreview, Minnesota, fundada em 1961 por um grupo de engenheiros graduados na Universidade de Minnesota, que compartilharam suas expertise em realizar medições exatas de fluxo em combustões turbulentas. A TSI possui atualmente alta tecnologia em geração e medições de particulados. O primeiro equipamento fabricado pela TSI, para testes de filtros para particulados foi o modelo AFT (Automated Filter Tester) 8110. Esse equipamento pode realizar ensaios tanto com aerossol de cloreto de sódio como de partículas oleosas. O ensaio de cloreto de sódio é feito a partir de uma solução aquosa de 1% do sal. Os equipamentos da TSI, AFT 8130 e AFT 8127 foram desenvolvidos para atender à necessidade de empresas fabricantes de respiradores e agência de testes, NIOSH, nos Estados Unidos, a realizar os ensaios de acordo com o estabelecido na norma 42 CFR 84 (Estados Unidos, 1995). Os dois equipamentos são idênticos. A única diferença é que o AFT 8127 possui apenas gerador de aerossol para partículas oleosas e o AFT 8130 possui dois geradores de aerossol, um para partículas oleosas e um para partícula de cloreto de sódio. Nesta dissertação, deste capítulo em diante, o equipamento TSI AFT 8110 será referido apenas como TSI 8110 e os equipamentos TSI AFT 8130/8127 serão referidos apenas como TSI 8130. (TSI INCORPORATED, 2006).

Figura 6.6 – Fotografia de um equipamento TSI AFT 8130/8127. Fonte: TSI INCORPORATED (2006).

O equipamento consiste de um gerador de aerossol que gera partículas com dimensões controladas. O aerossol é ionizado para neutralização das cargas elétricas formadas durante a atomização do líquido no gerador. Por meio de um sistema de vácuo provido de filtração final, essa mistura é forçada a passar através do filtro em teste. Amostras são tomadas antes e depois do filtro. As amostras são conduzidas a dois fotômetros de dispersão de luz independentes, por sistema de vácuo. O primeiro fotômetro é usado para detecção de altas concentrações do aerossol de teste, e o segundo para baixas concentrações tipicamente encontradas no ar efluente do filtro. A figura 6.6 apresenta uma fotografia do equipamento TSI 8130 e a figura 6.7, o esquema de funcionamento do equipamento. (TSI INCORPORATED, 2006).

Figura 6.7 – Esquema de funcionamento do equipamento TSI 8130/8127. Fonte: TSI INCORPORATED (2006).

6.2.1 Gerador de aerossol

O aerossol é gerado por múltiplos bicos nebulizadores que promovem a nebulização da solução de NaCl ou da substância oleosa que alimenta o gerador. O jato de gotículas se choca contra um impactador para separação das partículas grandes, reduzindo o valor médio e a dispersão de tamanho das partículas geradas para $0,26 \mu\text{m}$ de diâmetro médio mássico ou $0,075 \mu\text{m}$ de diâmetro médio por contagem de partículas, desvio padrão geométrico (GSD) menor que 1,83. Após ser gerado, o aerossol é misturado com cerca de 70 litros por minuto de ar limpo e ionizado, através da passagem por um bico com agulhas eletrizadas com corrente pulsante de alta voltagem. Após essa mistura, a concentração do aerossol permanece constante em um valor entre 15 e 20 mg/m^3 , independentemente do fluxo utilizado no ensaio. (TSI INCORPORATED, 2006).

6.2.2 Sistema de detecção

O equipamento possui dois fotômetros calibrados um contra o outro. Um deles é utilizado para medição da concentração de particulados existente antes da

passagem pelo filtro em teste, e o outro é utilizado para medições após a passagem pelo filtro. Uma amostra representativa das partículas presentes em cada um dos dois pontos de medições é retirada, combinada com um fluxo de ar filtrado chamado de “ar de bainha”, e direcionada ao fotômetro. O “ar de bainha” consiste de um fluxo de ar filtrado, que segue junto com o fluxo do aerossol de teste, formando uma espécie de capa protetora para esse fluxo. Ele ajuda a definir o fluxo de partículas, a melhorar o desempenho do fotômetro e a manter o sistema ótico limpo. O primeiro fotômetro é um equipamento simples, que oferece baixa resolução, uma vez que é usado apenas para análise de concentração de partículas antes da passagem pelo filtro em teste. O segundo fotômetro utiliza um diodo de laser de alta potência e consegue uma resolução muito maior, para possibilitar a medição de valores de concentrações baixas suficientes a fim de permitir medições de penetração da ordem de 0,001 %. As concentrações são determinadas pelos sinais de voltagem emitidos pelos fotômetros. Esses sinais são proporcionais às massas de partículas contidas nos aerossóis. Um esquema do sistema de detecção do equipamento 8130 é mostrado na figura 6.8. (TSI INCORPORATED, 2006).

Figura 6.8 – Esquema de funcionamento do sistema de detecção do equipamento TSI 8130. Fonte: TSI INCORPORATED (2006).

6.3 ESTUDOS COMPARATIVOS ENTRE EQUIPAMENTOS DE TESTES DE FILTROS PARA PARTICULADOS.

6.3.1 Introdução

Os dois parâmetros mais importantes na avaliação de um filtro de um respirador para particulados são: a resistência à respiração e a eficiência do filtro. A resistência à respiração é freqüentemente expressa como queda de pressão através do filtro medida com um fluxo específico. É relativamente fácil e rápido de se medir, porém não se pode esquecer de corrigir a resistência ao fluxo oferecida pelo equipamento de teste e a influência da densidade do ar. (TORLONI e VIEIRA, 2003).

A eficiência do filtro depende da velocidade do ar através do meio de filtração, do tamanho aerodinâmico do aerossol utilizado no teste, do carregamento do filtro e da distribuição de cargas do aerossol. Todos esses fatores têm que ser controlados para se conseguir resultados repetitivos. Por estas razões, o teste de eficiência do filtro é geralmente executado com um aerossol gerado para este fim, por dispersão de um particulado muito fino. (SIMPSON, 1991).

A norma 30 CFR 11 (Estados Unidos, 1978 A), utilizada pelo NIOSH para testes de filtros para particulados até 1995, especifica poeiras de sílica e fumos metálicos para realização desses ensaios. Na Europa, sempre se utilizou aerossóis de cloreto de sódio ou óleo de parafina. Somente os ensaios de entupimento do filtro são realizados com poeira de dolomita. Com o objetivo de aumentar a severidade do teste, as novas versões das normas de ensaio requerem o uso de partículas que, além de possuírem tamanho mais penetrante (MPPS), tenham características físicas e químicas que interajam com o material que constitui o filtro, de tal forma a submetê-lo a uma carga destas partículas, e verificar sua resistência à degradação. Isso levou ao desenvolvimento de vários equipamentos, entre eles os descritos no capítulo anterior. Por outro lado, tendo em vista que: esses filtros são partes de um equipamento de proteção respiratória, cujo uso é regulado por normas e regulamentos; que laboratórios credenciados por organizações governamentais ou laboratórios acreditados por sistemas de qualidade, localizados em vários países realizam ensaios nestes filtros; é esperado que equipamentos de testes de

diferentes concepção e construção respondam de forma equivalente ou similar, quando ensaiam filtros que possuam a mesma eficiência.

Esforços têm sido desenvolvidos por empresas fabricantes de respiradores, por agências de governo e empresas especializadas em construção de equipamentos de testes para se demonstrar a exatidão de resultados de testes obtidos por estes equipamentos. Um exemplo desse esforço foi o desenvolvimento do equipamento AFT 8110. Uma parceria entre a empresa TSI e um fabricante de respiradores possibilitou a construção deste equipamento, o qual tem sido amplamente utilizado por vários laboratórios em todo mundo, e foi o precursor do AFT 8130, muito utilizado pelo NIOSH e também disponível na Fundacentro.

6.3.2 Estudos preliminares para o desenvolvimento do TSI 8110

O equipamento TSI 8110 foi desenvolvido nos anos 80. Segundo Simpson e Iverson (1991) alguns dos requisitos básicos para sua construção eram: rapidez na obtenção dos resultados de testes, confiabilidade de resultados; baixo custo operacional e facilidades de uso e de manutenção. O equipamento destinava-se a uso em laboratórios de controle de qualidade. A base de comparação escolhida para o desenvolvimento de tal instrumento de teste foram os equipamentos utilizados na Europa: Moore's, que utiliza cloreto de sódio e o ATI Q 127's, equipamento de ensaio que utiliza óleo de parafina aquecido como agente de ensaio. O estudo foi conduzido por Kenneth Simpson, então responsável por qualidade assegurada nos laboratórios da 3M em Saint Paul, MN, EUA.

6.3.2.1 Metodologia utilizada no estudo para desenvolvimento do TSI 8110

O protocolo definido para realização deste estudo definido por Simpson e Iverson (1991) previa o uso de sete combinações de dois tipos de material filtrante. Desta forma foi possível cobrir uma larga faixa de percentagens de penetração. Estudos anteriores já haviam utilizados filtros parecidos, o que possibilitou fazer comparações entre estes vários estudos. O primeiro material escolhido foi fibra de vidro. No total, foram escolhidos três níveis de eficiência de filtros de fibra de vidro,

produzidos pelo mesmo fabricante. As várias combinações possíveis entre esses três materiais permitiram percentagem de penetração entre 0,001 e 10 %. O segundo material utilizado foi um filtro fabricado com micro-fibras de polipropileno, tratadas eletrostaticamente, as quais eram utilizadas na fabricação de respiradores semifaciais do tipo peças semifaciais filtrantes (PFF). Para obter níveis de penetração que cobrissem toda a faixa de penetração proposta no estudo, as camadas de filtro de polipropileno eram sobrepostas, até atingirem sete camadas.

Os procedimentos para realização dos testes requereram um total de cinco testes independentes, para cada uma das combinações. Os cinco resultados de testes permitiram, então, o cálculo da média para cada um dos pontos de penetração medidos. Assim foi possível determinar a variação de resultados em cada equipamento, em cada faixa de penetração.

Os parâmetros de testes foram ajustados e padronizados de acordo com os parâmetros de operação do equipamento Moore's, concentração do aerossol de testes igual a 12 mg/m^3 e fluxo de 95 litros por minuto. Para o teste com substâncias oleosas, o equipamento da TSI foi ajustado de tal forma a gerar aerossol de DOP a uma concentração aproximada de 100 mg/m^3 e fluxo de 32 l/min, os mesmos parâmetros de operação do equipamento ATI Q-127's.

6.3.2.2 Resultados obtidos no estudo para desenvolvimento do TSI 8110

Em todos os níveis de penetração, com amostras de filtros de fibra de vidro, os resultados obtidos nos testes realizados entre equipamentos TSI 8110 apresentaram menor variabilidade que os resultados obtidos entre equipamentos Moore's. Quando se considera somente os resultados obtidos no mesmo equipamento, as variações foram aproximadamente iguais. As diferenças foram mais significativas nos menores níveis de penetração. Por exemplo, nos testes realizados com BMF, os dois equipamentos demonstraram boa equivalência (em torno de 25 % da média) quando o nível de penetração estava em torno de 10%. Conforme o nível de penetração decrescia, as variabilidades no mesmo equipamento e entre equipamentos cresceram rapidamente. Isto ficou mais evidenciado nos testes realizados com os equipamentos da TSI comparativamente aos realizados nos equipamentos Moore's. Quando o nível de penetração atingiu

valores próximos a 0,01%, um quarto dos equipamentos TSI 8110 apresentaram resultados de penetração acima de $\pm 50\%$ em torno da média, ou seja, fora da faixa de aceitação. Em contrapartida, nenhum equipamento Moore's apresentou resultados fora dessa faixa de variação. A variabilidade nos resultados obtidos nos testes realizados no mesmo equipamento foi quase duas vezes maior no modelo da TSI que a encontrada no equipamento Moore's.

O estudo conclui que os resultados obtidos nos equipamento TSI, modelo 8110, não são tão consistentes quanto os apresentados pelo equipamento Moore's. (SIMPSON e IVERSON, 1991).

6.3.3 Ensaios comparativos realizados pelos laboratórios europeus

Bostock (1990) conduziu um estudo comparativo entre laboratórios europeus para verificar a reprodutibilidade dos resultados de testes com cloreto de sódio e óleo de parafina. Havia dúvidas se os parâmetros definidos na norma eram suficientes para garantir que ensaios realizados por diferentes laboratórios eram comparáveis.

Os dois métodos estavam especificados na versão de 1991 da EN 143 (CEN, 2006) para determinação da penetração em filtros para particulados:

- ✓ O método utilizando aerossol de cloreto de sódio a uma concentração especificada em aproximadamente 8 mg/m^3 , diâmetro médio mássico diagonal das partículas de $0,65 \mu\text{m}$. A concentração de aerossol, segundo a norma deveria ser medida por fotometria de chama baseada na emissão de luz sódio a 589 nm. Filtros de densidade neutra deveriam ser utilizados para atenuar os efeitos da luz que entra no tubo fotomultiplicador. Esta descrição conduz claramente à utilização do equipamento Moore's, equipamento utilizado pelos laboratórios europeus.
- ✓ O método alternativo descrito na versão de 1991 da EN 143 (CEN, 2006) especifica óleo de parafina, um óleo mineral, como agente de ensaio. A concentração de ensaio foi definida em 20 mg/m^3 . O método prevê que a medida de concentração após a passagem pelo filtro deveria ser medida por fotometria de dispersão de luz. Uma configuração sugerida está descrita na norma, mas o equipamento de teste completo não é disponível comercialmente. Por esta razão, cada laboratório construiu seu próprio

equipamento de testes. Entretanto, eles podem emitir seu próprio relatório, especificando se o filtro atende aos requisitos de penetração, conforme definidos na norma. O relatório de análise é aceito pelos diversos organismos de aprovação de filtros para respiradores, e o produto pode ser comercializado em qualquer país do continente europeu.

A finalidade do estudo foi verificar a reprodutibilidade de resultados de ensaios com substâncias oleosas realizados em amostras de filtros padronizados e controlados. Dez laboratórios de testes de filtros para particulados participaram deste estudo. Os laboratórios estavam situados em diferentes locais na Europa. As amostras foram preparadas no laboratório da 3M em Aycliffe, Inglaterra, e enviadas para os demais laboratórios de acordo com uma seqüência definida e registrada em duas listas. Uma lista continha o nome de cinco laboratórios e a outra, quatro. (BOSTOCK, 1990).

6.3.3.1 Metodologia utilizada no estudo europeu

As amostras foram retiradas de um rolo único de filtros fibra de vidro fabricado de forma controlada e com pouca variação de qualidade. As amostras foram cortadas no formato de placas planas circulares. Elas foram sortidas randomicamente em lotes contendo 30 placas. Um lote foi selecionado arbitrariamente e submetido a testes de penetração e resistência à respiração, a um fluxo de 95 litros por minuto. As placas foram colocadas em um suporte, o qual permitia uma área efetiva de exposição do filtro de 100 cm². O protocolo adotado requeria que a medida de penetração fosse feita após uma exposição inicial de 3 minutos do filtro ao aerossol de teste. Em seguida, um segundo filtro foi colocado sobre o primeiro, e testado. Após o segundo teste, um terceiro filtro foi colocado sobre os dois primeiros, e testado. Seguiu-se este procedimento até atingir cinco camadas de placas de filtro, quando foi realizado o quinto e último teste da série. Após o último teste, os filtros removidos do suporte e dois novos conjuntos de filtros foram testados, seguindo o mesmo procedimento. No final dos três conjuntos de testes, 15 resultados de penetração e 15 resultados de resistência à respiração foram obtidos. Estas condições de testes foram definidas com o objetivo de cobrir a faixa de valores de penetração entre 0,01% e 10% e de resistência a respiração entre 2 e 10 mbar.

Conjuntos de placas de filtros e suportes foram enviados ao primeiro dos cinco laboratórios da lista com os nomes dos laboratórios participantes. Cada laboratório selecionou arbitrariamente um dos conjuntos de filtros e realizou os testes, seguindo os procedimentos definidos. Após completar os testes, os filtros não utilizados e o suporte foram enviados para o próximo laboratório da lista. Um novo conjunto de filtros e outro suporte foram enviados ao grupo de quatro laboratórios, de tal forma que foram obtidos resultados de um total de 10 laboratórios de testes, incluindo o laboratório de Aycliffe.

Quando os suportes e os filtros não utilizados retornaram, 10 meses após o início do programa, um conjunto foi selecionado para re-teste de tal forma a assegurar que era possível reproduzir os mesmos resultados no laboratório que iniciou os estudos, na Inglaterra.

Um novo conjunto de testes foi realizado posteriormente, usando filtros de fibra de vidro plissados disponíveis comercialmente na Europa em 1990. (BOSTOCK, 1990).

6.3.3.2 Resultados obtidos no estudo europeu

O coeficiente de variação entre os resultados obtidos por um único laboratório de teste foi baixo, na ordem de 5%. O coeficiente de variação dos valores de penetração obtidos quando testadas cinco camadas de placas de filtro foram maiores que os obtidos nos testes com menor número de camadas. Isso pode estar relacionado com o fato dos valores de penetração obtidos nos testes com cinco camadas estarem próximos do limite de resolução do equipamento de teste. Onde se obteve altos valores de coeficiente de variação, esses foram atribuídos a um único resultado alto de penetração, possivelmente ocasionado por danos ocorridos no filtro. A variabilidade entre diferentes amostras de filtros foi baixa. Portanto, as diferenças registradas entre laboratórios puderam ser atribuídas a diferenças nos testes e não nas amostras. (BOSTOCK, 1990).

Os resultados de penetração de névoas de óleo de parafina apresentados na figura 6.9 demonstraram que existe uma relação linear de valores de penetração quando plotados na escala logarítmica. A maioria dos resultados aparece amontoados, exceto os valores referentes ao laboratório F, o qual, evidentemente, teve

problemas com o seu sistema de medições. Os resultados apresentados por esse laboratório foram excluídos da análise apresentada na figura 6.10.

Figura 6.9 – Representação gráfica dos valores de penetração de névoas de óleo em filtro de fibra de vidro apresentados por 10 laboratórios europeus. (BOSTOCK, 1990).

Nas curvas representadas no gráfico da figura 6.10, cada ponto representa o valor do coeficiente de variação normalizado versus o número de camadas de filtros testados. O coeficiente de variação normalizado foi obtido pelo quociente entre o valor médio de penetração, obtido por cada equipamento nos testes realizados, com o número de camadas marcado no eixo das abscissas (eixo X), pelo valor médio dos resultados de penetração obtidos por todos os laboratórios, nos testes realizados com aquele número de camadas de filtro.

$$COV = \frac{\text{Penetração Individual}}{\text{Penetração Média}} \quad (6.1)$$

Onde:

COV = Coeficiente de Variação

Penetração Individual = Valor médio em percentagem dos resultados de penetração obtidos por um equipamento específico nos testes realizados com o número de camadas marcado no eixo X.

Penetração Média = Valor médio em percentagem dos resultados de penetração obtidos por todos os equipamentos nos testes realizados com o número de camadas marcado no eixo X.

A variação de resultados entre laboratórios fica mais evidente nos resultados obtidos com cinco camadas de filtros, atingindo valores de coeficiente de variação (COV) próximos a 2. Como consequência dessa grande variação, quando a maioria dos laboratórios aprovariam um filtro como P3, por obter valor de penetração abaixo de 0,01%, limite especificado na norma EN143 (CEN,1990), três laboratórios teriam reprovados esse mesmo filtro. Segundo Bostock, é possível que essa diferença esteja relacionada a diferenças na distribuição de tamanhos de partículas na câmara de testes. Na época em que esse estudo foi conduzido, recursos para medições de tamanhos de partículas não estavam disponíveis em todos os laboratórios de ensaios.

Por essa razão, um segundo conjunto de filtros com vazamento controlado foi preparado para envio aos mesmos laboratórios. Os filtros foram perfurados de tal forma que os diâmetros das perfurações eram maiores, em ordem de magnitude, que os diâmetros prováveis das partículas utilizadas nos ensaios. Dessa forma, os valores de penetração deveriam ser independentes dos diâmetros das partículas dos aerossóis utilizados nos ensaios. Os resultados desse segundo estudo estão apresentados no gráfico da figura 6.11. A legenda do eixo das abscissas indica o tipo de filtro usado nos testes. Os filtros da série “A” possuem a mais alta eficiência e da série “D” a mais baixa eficiência. Os filtros das séries “B” e “C” são de eficiências intermediárias, sendo o “B” mais eficiente que o “C”.

Comparando a figura 6.10 com a figura 6.11 nota-se uma grande melhoria na reprodutibilidade dos resultados de penetração. A faixa de variabilidade foi reduzida em 30% nos dois lados da média, na comparação dos filtros perfurados com os filtros utilizados no primeiro estudo. O aumento da variabilidade com o decréscimo dos valores médios de penetração mostrado no gráfico da figura 6.10 não ficou evidenciado com os filtros perfurados figura 6.11. Esses resultados foram considerados consistentes e demonstraram que a distribuição de diâmetros do aerossol de teste foi o fator primordial para a alta variabilidade de resultados constatados na primeira parte do estudo inter-laboratorial realizado.

Figura 6.10 – Representação gráfica da variação de resultados de um laboratório comparado com a média de resultados obtidos por todos os laboratórios em cada faixa de penetração. (BOSTOCK, 1990).

Figura 6.11 – Representação gráfica dos valores de penetração de névoas de óleo normalizados em filtros perfurados. (BOSTOCK, 1990).

Como muitos dos equipamentos de testes tinham sido montados nos próprios laboratórios, existiam muitos dispositivos mecânicos que poderiam influenciar na distribuição de tamanho do aerossol na câmara de teste. Um desses dispositivos podia ser o meio utilizado para diluir o aerossol gerado, com o intuito de se atingir a concentração de 20 mg/m^3 , requerida na norma de ensaio. A norma especificava o uso de um frasco de vidro que utiliza o efeito “venturi” para tal (ver figura 6.12).

Figura 6.12 – Frasco de mistura de aerossol oleoso, conforme especificado na norma europeia EN 143 (CEN, 2006) e NBR 13697 (ABNT,1996). Adaptação feita a partir de Bostock, 1990, p. 9.

No frasco da figura 6.12, o ar é soprado através do “venturi”, de tal forma que uma parte da névoa de óleo gerada é arrastada, através do braço lateral, obtendo-se o fluxo e a concentração corretos. Pelo desenho, o frasco incorpora uma câmara que promove um movimento circular do aerossol para provocar a separação de partículas grandes. Essa câmara age como um ciclone e deve influir na distribuição

de tamanhos das partículas contidas no aerossol. No laboratório de Aycliffe foram realizados testes com névoas de óleo, usando diferentes fluxos de ar no frasco. Os filtros utilizados nesses testes eram aqueles utilizados na primeira parte do estudo (filtros não perfurados). Os resultados desses testes demonstraram que o aumento do fluxo no frasco de vidro resultou em um aumento de penetração através do filtro (figura 6.13). Concluiu-se que o aumento do fluxo no frasco de vidro aumentou a ação do efeito ciclone, com conseqüente aumento na retenção de partículas grandes. Uma análise mais detalhada do diâmetro das partículas não foi realizada. Apesar de existir uma especificação para a maioria das dimensões do frasco de vidro de diluição na norma EN143:1990, a curvatura do bico não está definida, característica determinante na ação do ciclone. A conclusão final do estudo foi que esse poderia ter sido um dos fatores que levaram à variabilidade observada entre os resultados produzidos pelos laboratórios.

Figura 6.13 – Representação gráfica dos efeitos da diluição sobre os resultados de penetração. (BOSTOCK, 1990)

Considerando que a variabilidade observada foi devida às diferenças construtivas entre os vários equipamentos utilizados para testes dos filtros, foi investigado como seria essa variabilidade caso os laboratórios utilizassem equipamentos construídos pelo mesmo fabricante. Para isso, utilizaram um estudo realizado com

equipamentos da TSI modelo 8110, no qual os testes de penetração foram realizados com filtros similares a àqueles utilizados pelos laboratórios europeus. Os testes de penetração através do filtro foram realizados com aerossol de cloreto de sódio. O gráfico da figura 6.14 mostra os resultados normalizados, usando de 1 a 7 camadas de placas de filtros (valores de penetração entre 13 e 0,006 %). Pode-se notar que até 6 camadas de filtros, aproximadamente 0,02% de penetração, a variação dos resultados estão dentro de uma faixa de cerca de 50% do valor médio. Com 7 camadas, a medida que se aproxima do limite de resolução do equipamento, a faixa dos valores torna-se maior. Embora a distribuição de resultados obtidos por um equipamento da TSI fosse menor que a distribuição constatada por um equipamento operado com óleo de parafina na primeira parte do estudo, a variação dos resultados é maior que aquela obtida com os filtros perfurados. Lembrando que os resultados de testes realizados com os filtros perfurados independem da distribuição do tamanho de partículas na câmara de aerossol, era esperado que os equipamentos da TSI, por serem montados por um mesmo fabricante, dentro das mesmas especificações, apresentassem uma faixa da variação de resultados, no mínimo, igual à observada nos testes com filtros perfurados.

Figura 6.14 – Representação gráfica dos valores de coeficientes de variação do equipamento TSI 8110. (BOSTOCK, 1990).

6.3.3.3 Conclusões do estudo europeu

Os estudos conduzidos em 1990, com os laboratórios europeus acreditados para testes de filtros para particulados mostraram que existiam diferenças significativas nos resultados de valores de penetração com óleo de parafina, em testes realizados com filtros de fibra de vidro. As diferenças tornavam-se mais marcantes à medida que os valores de penetração decaíam. Como resultado dessa observação, era possível que um laboratório acreditado poderia aprovar um filtro que atendesse aos requisitos relevantes de desempenho estabelecidos na norma EN 143 (CEN, 2006), enquanto que outro laboratório, igualmente acreditado, poderia reprovar esse mesmo filtro.

As diferenças de resultados de testes entre laboratórios foram consideravelmente reduzidas quando foram utilizados filtros de alta eficiência perfurados. Conforme mencionado e discutido no capítulo 5, a distribuição de tamanho de partículas produzidas no gerador de aerossol tem um impacto significativo sobre os resultados de penetração em filtros para particulados. As características no desenho do equipamento, que influenciam nos resultados observados, também foram identificadas.

A comparação com outro estudo realizado, porém utilizando equipamentos que possuíam o mesmo desenho, comercialmente disponíveis, demonstrou que apesar de terem variabilidades menores que aquelas observadas entre os equipamentos utilizados na Europa ainda era superior àquela esperada (iguais ou menores que a variabilidade observada nos testes com os filtros perfurados). (BOSTOCK, 1990)

6.3.4 Programa inter-laboratorial round robin

No período entre 1992 e 2006 foram realizados 14 estudos comparativos entre laboratórios que utilizam os equipamentos Moore's, ATI modelo TDA 100P, TSI AFT 8110 e 8130/8127, entre outros. A figura 6.15 mostra a divisão por modelo de equipamentos participantes da edição 2006. Conduzidos por Kenneth Simpson e Michael Cadalbert, esse programa envolveu laboratórios de testes existentes em todo o mundo, inclusive no Brasil. Os parâmetros avaliados foram medições instantâneas de queda de pressão e percentagem de penetração com aerossol de

cloreto de sódio, DOP e óleo de parafina. O programa foi denominado “round robin”, comum em estudo dessa natureza e uma alusão ao pássaro pintarroxo, “robin” em inglês, o qual sempre retorna ao ponto de origem após um longo vôo. (3M OCCUPATIONAL HEALTH AND ENVIRONMENTAL SAFETY DIVISION, 2007).

Figura 6.15 – Modelos de equipamentos de testes participantes no programa de 2006. Fonte: 3M OH&ESD, 2007.

Fizeram parte desses estudos equipamentos utilizados para controle de qualidade, pesquisa e aprovação de respiradores. No programa realizado em 2006, 99 testes foram realizados em 69 equipamentos diferentes. A figura 6.16 mostra uma divisão dos equipamentos que participaram do programa de 2006 por uso a que se destinaram.

Figura 6.16 - Distribuição de equipamentos de teste por finalidade de uso. Fonte: 3M OH&ESD, 2007.

A tabela 6.1 foi elaborada para possibilitar uma comparação direta de algumas características de três equipamentos utilizados para testes de filtros para particulados. Algumas dessas características impactam apenas na operacionalidade do equipamento, com baixo potencial de provocar diferenças nos resultados de ensaio. Por outro lado, dimensão e distribuição de tamanhos de partículas afetam significativamente o nível de exatidão do equipamento, conforme visto no capítulo 6.3.3.3 – Conclusões do estudo europeu. Três dos quatro equipamentos de ensaios possuem faixa estreita de dispersão de tamanhos de partículas. Única exceção é o equipamento TSI, modelo 8110, o qual deve ser equipado com um gerador de aerossol modelo 8118-A, para atender aos requisitos de dimensão e distribuição de partículas especificados na norma 42 CFR 84 (Estados Unidos, 1995).

Tabela 6.1 - Comparação entre diferentes equipamentos de testes de filtros para particulados.

	TSI Modelo 8110	TSI Modelo 8127 / 8130	Moore's Bench Rig
Aerossol de teste	Sólido e líquido	Sólido e líquido	Sólido somente
Distribuição de tamanhos de partículas	Faixa larga (8110). Faixa estreita opcional (8118A)	Faixa estreita	Atende requisitos EN 143
Faixa de penetração (% Eficiência = 100% - %Pn) 0.001 %Pn = 99.999% Eficiência	100% a 0.001% com óleo e sal (2%) 100% to 0.01 com sal (1%) 100 % a 0.001 com 8118A	100% a 0.001% com ambos os óleo e sal	100% a 0.001% com sal somente (pode ser estendido a 0.0001%)
Nebulizador do aerossol	Opção (TSI modelo 8113)	Padrão	Nenhum
Gerador de fluxo	Pressão positiva (Resistência do filtro afeta o fluxo)	Pressão negativa (Grande estabilidade de fluxo ao longo do tempo)	Pressão Positiva (Resistência do filtro afeta o fluxo)
Rapidez do teste instantâneo	31 segundos (42 segundos com impressão)	Variável	30 segundos, depende do volume
Interface com o usuário	Botões no painel frontal	Display do tipo "Touch Screen"	Ajuste de válvulas no painel frontal
Capacidade de controle externos (Interfaces robóticas)	Nenhum	Capacidades de conexões construídas no circuito. Interface é opcional.	Nenhuma
Modo Aprova/Reprova	Nenhum	Pode ser definido para fluxo, queda de pressão e %Pn	Pode ser definido de zero para escala cheia
Saída de dados	Display, impressora e RS232	Display, impressora e RS232	Medidor analógico. Saída para impressora de gráficos
Transdutor de pressão para zeragem	Automático	Automático	N/A Manômetro opcional
Deteção do aerossol	Um fotômetro com válvula de mudança de fluxo e zero automático	Dois fotômetros com zero automático	Fotômetro de chama de hidrogênio
Atendimento a especificações de normas de testes.	42CFR84 - DOP e sal com gerador de aerossol 8118A e neutralizador 8113	42CFR84 - Ambos DOP e sal	EN143 e NBR 13697 - Sal

Fonte: 3M OH&ESD, 2007

6.3.4.1 Objetivos do programa “round robin”

O programa “round robin” tem como objetivo estabelecer um processo de proficiência entre laboratórios de ensaios de filtros para particulados utilizados como parte de um equipamento de proteção respiratória. Por essa razão, tem sido seguido um protocolo previamente definido para evitar desvios que não sejam inerentes ao equipamento analisado. Os resultados apresentados por cada equipamento em particular são comparados com os resultados apresentados por outros equipamentos, o mesmo modelo participante. O programa também permite comparações de resultados no mesmo equipamento, realizados no mesmo ano ou em anos diferentes. Um relatório completo é preparado ao final de cada programa, e um relatório individualizado é enviado a cada laboratório. As especificações para determinar se o equipamento passou ou falhou nos testes foram baseadas nos resultados apresentados por todos os equipamentos, de tal forma que um resultado de teste individual pode ser comparado coletivamente com o mesmo modelo de instrumento de teste e aerossol utilizado. Pelo fato de terem sido realizados 14 estudos, com vários modelos de equipamentos, existem informações disponíveis que permitem comparações entre esses equipamentos. (SIMPSON e IVERSON, 1991).

6.3.4.2 Protocolo de testes “round robin”

Para assegurar que cada laboratório/equipamento recebesse filtros com qualidade equivalente, alguns cuidados foram tomados no processo de seleção das amostras. Mais de 500 placas circulares são retiradas de um único rolo de filtro de fibra de vidro, grau HF-0513, fabricado por Hollingsworth & Vose Co. O grau de eficiência dos filtros segundo a norma ASHRAE, é de 80 – 85 %. Antes de serem enviados, amostras dos filtros são testadas nos laboratórios da 3M em Saint Paul, MN, EUA, seguindo as mesmas condições de testes especificadas para os demais laboratórios. Após os testes, as placas de filtro são manuseadas cuidadosamente e enviadas para os laboratórios participantes do programa. O processo de seleção de amostras foi estabelecido com o propósito de minimizar as variações existentes nos filtros e seu impacto nos valores de penetração e queda de pressão.

Os laboratórios participantes recebem instruções sobre como fazerem os ajustes nos equipamentos e como realizarem os testes. Os filtros de fibra de vidro são sobrepostos em camadas, de forma a obter níveis de penetração que diminuem a cada nova camada acrescentada. Assim, obtêm-se resultados de penetração que vão desde a faixa de 10% a 0,001%, cobrindo toda a gama de eficiência de filtros disponíveis. (SIMPSON, 1991)

6.3.4.3 Resultados obtidos no programa “round robin”

6.3.4.3.1 Repetibilidade

Nos estudos, dos quais laboratórios brasileiros têm participado, realizados entre os anos 1989 e 1993, foi dado foco especial à repetibilidade de resultados apresentados pelos equipamentos TSI 8110 e Moore's. O protocolo de teste requeria que, em cada conjunto de filtros, fossem realizadas cinco medições consecutivas de penetração e de queda de pressão. Os valores de cada uma dessas medições foram registrados. Para cada série de filtros testados, foram calculadas a média aritmética e definidas faixas de variação consideradas aceitáveis. Para os valores de penetração, essa faixa foi definida em $\pm 25\%$ em torno do valor médio. Para queda de pressão, foi definida uma faixa de $\pm 10\%$.

6.3.4.3.1.1 Repetibilidade de resultados do TSI 8110

Um resumo dos resultados de penetração obtidos pelos 27 equipamentos TSI, modelo 8110, no período entre 1990 e 2006, são mostrados no gráfico da figura 6.17 (CADALBERT e SIMPSON, 2006).

Figura 6.17 – Representação gráfica dos valores de penetração de aerossol de cloreto de sódio nos equipamentos da TSI, modelo 8110. Fonte: CADALBERT e SIMPSON, 2006.

Cada equipamento é representado por uma linha, no gráfico. Cada ponto é uma média dos cinco valores de penetração obtidos nos ensaios. A coordenada foi plotada em escala logarítmica para incluir cinco faixas de valores de penetração entre 0,001 até 100 %. Portanto, pequenas diferenças entre equipamentos não são visíveis na figura.6.17.

Porém, é possível notar que em até 6 camadas de filtro existe uma boa concordância entre os valores obtidos. Outra constatação observável nesse gráfico é que as linhas não estão cruzando umas com as outras. Isso leva à interpretação de que a posição relativa entre um equipamento e outro é mantida. Em outras palavras, se um equipamento obteve resultado de penetração maior que os outros equipamentos no ensaio com uma camada de filtro, essa relação comparativa é mantida para os resultados com 2, 3, 4, 5, 6 e 7 camadas.

No programa de 1993, um estudo similar foi realizado. Os valores obtidos nos testes realizados em 28 equipamentos TSI, modelo 8110, foram agrupados de forma crescente e plotados no gráfico da figura 6.18. Os resultados em amarelo

(série 4) referem-se a valores obtidos com conjuntos de quatro filtros; em azul (série 3), três filtros; em verde (série 2), dois filtros; e finalmente em vermelho (série 1), correspondentes a um único filtro.

Figura 6.18 – Representação gráfica dos valores de penetração aerossol de aerossol de cloreto de sódio nos equipamentos da TSI, modelo 8110, por faixa de penetração. Fonte: CADALBERT e SIMPSON, 2006.

Com relação aos valores de queda de pressão, analisando o gráfico da figura 6.19, constata-se que sete, dos 28 equipamentos participantes, apresentaram valores de queda de pressão fora da faixa de aceitação. Considerando que a queda de pressão é função da taxa de fluxo, é de se supor que os sete equipamentos que apresentaram altos valores de queda de pressão devem ter sido operados com altas taxas de fluxo. Isso ajuda a explicar porque alguns desses equipamentos também apresentaram baixos valores de percentagem de penetração.

Figura 6.19 – Representação gráfica dos valores de queda de pressão nos equipamentos da TSI, modelo 8110. Fonte: CADALBERT e SIMPSON, 2006.

Conforme protocolo definido por Cadalbert e Simpson (1996), foram realizados 5 testes em cada um dos 7 níveis de penetração. A repetibilidade de resultados produzidos por cada equipamento, durante a realização dos cinco testes consecutivos, foi observada através do cálculo do Coeficiente de Variação – COV. Para isso, foram calculados a média e o desvio padrão para cada um dos conjuntos de filtros testados. O COV foi calculado dividindo o valor do desvio padrão pelo valor da média. O COV permite comparar desvios de grandezas diferentes, ou seja, comparáveis independentemente do valor médio da penetração. No gráfico da figura 6.20 estão marcados os valores de COV da percentagem de penetração para cada equipamento, em cada uma das faixas de eficiência medidas no programa “*round robin*”, realizado em 1992.

Figura 6.20 – Representação gráfica dos valores de coeficientes de variação dos equipamentos TSI, modelo 8110, participantes do programa “round robin” de 1992. Fonte: CADALBERT e SIMPSON, 2006.

Nota-se que um equipamento tem o valor de COV muito maior que os outros, em todos os níveis de penetração. Investigações posteriores demonstraram que esse equipamento apresentava muita variação na pressão da linha de ar comprimido que supria o equipamento. Segundo Cadalbert e Simpson (2006), a variação de um resultado individual em relação à média dos cinco valores obtidos em testes realizados em seqüência, com os mesmos filtros, em um mesmo equipamento de teste, não deveria ser superior a 10%.

Nos dois primeiros programas, o número de equipamentos TSI, modelo 8110, que apresentaram resultados fora do critério de $\pm 25\%$ da média era menor que nos estudos posteriores. Considerando que vários equipamentos participaram de mais de um programa, ou seja, houve pouca alteração de unidades participantes, esse fato sugere que havia deficiências nas manutenções desses equipamentos. Como era esperado, o número de equipamentos fora do critério de variabilidade aumenta com a diminuição do valor de penetração através do filtro.

6.3.4.3.1.2 Repetibilidade de resultados do Moore's

A mesma análise de repetibilidade foi feita com os resultados obtidos nos testes realizados no equipamento Moore's. Os valores de COV para % de penetração foram calculados para as três unidades de equipamentos Moore's participantes do estudo (CADALBERT e SIMPSON, 2006).

Figura 6.21 – Representação gráfica dos valores de coeficientes de variação dos equipamentos Moore's, participantes do programa "round robin" 1992. Fonte: CADALBERT e SIMPSON, 2006.

O que se nota no gráfico da figura 6.21 é que um equipamento teve boa repetibilidade, apresentando valores de COV abaixo de 5%. O outro equipamento apresentou resultados bastante consistentes, com COV em torno de 10%, e o terceiro estava entre os dois outros equipamentos nos testes realizados com uma, duas e três camadas de filtro. Não foi possível fazer comparações de repetibilidade desses resultados com os resultados obtidos pelo modelo TSI 8110, pois os dados eram insuficientes.

Nas figuras 6.22 e 6.23, estão as percentagens de resultados obtidos pelos equipamentos TSI 8110 e Moore's, que se apresentaram fora da faixa do critério de controle de variação de $\pm 25\%$ da média, por faixa de penetração. Nos dois casos, o número de resultados fora do critério de controle foi crescente, no período entre 1989 e 1994. Isto é, os resultados do ano eram maiores que os resultados apresentados no ano anterior. Essa constatação comprova a afirmação feita em

6.3.4.3.1.1 - Repetibilidade de resultados do TSI 8110, de que havia problemas com a manutenção desses equipamentos, o que justificava a existência de problemas relacionados à repetitividade de resultados.

Figura 6.22 – Representação gráfica percentagem de equipamentos TSI 8110 que apresentaram resultados fora do critério de controle, nos “round robins” 1989 a 1994. Fonte: SIMPSON, 1995.

Figura 6.23 – Representação gráfica percentagem de equipamentos Moore's que apresentaram resultados fora do critério de controle, nos round robins 1989 a 1994. Fonte: SIMPSON, 1995.

O número de equipamentos Moore's participantes do programa “round robin” entre os anos de 1989 e 1993 foi bem pequeno, se comparado com o número de equipamentos da TSI. Esse fato dificulta qualquer comparação de variabilidade entre os dois modelos de equipamentos. Porém, os dados mostrados nos dois

gráficos acima indicam que os modelos 8110 são mais consistentes em entrega de resultados de medições de penetração na faixa compreendida entre 1 e 20 %.

6.3.4.3.1.3 Comparativos de variabilidade por equipamento

Uma outra análise da variabilidade de resultados nos testes é apresentada no relatório do estudo realizado em 2006. Nas figuras 6.24 até 6.27 estão graficamente representadas as seguintes informações: número de equipamentos que apresentaram resultados dentro da faixa de controle para queda de pressão e penetração; número de equipamentos que apresentaram 1 ou 2 medições fora dos parâmetros de controle; número de equipamentos que apresentaram 3 ou 4 medições fora dos parâmetros de controle; 5 ou 6; e finalmente 7 ou 8. Os gráficos estão organizados por concentração de cloreto de sódio na câmara, 1 ou 2 % e tipo de aerossol oleoso utilizado. Os gráficos foram construídos de acordo com o tipo de aerossol de ensaio utilizado, se NaCl, óleo de parafina ou DOP. Os resultados com NaCl foram ainda divididos de acordo com a concentração de sal na solução utilizada para criar a névoa de cloreto de sódio, se 1% ou 2%. Os equipamentos que utilizam 1% de cloreto de sódio no frasco nebulizador são Moore's e TSI 8110. O equipamento TSI 8130 utiliza 2%. (3M OH&ESD, 2007)

Figura 6.24 – Representação gráfica do número de equipamentos de testes que geram aerossol a partir de solução com 1% de NaCl, fora da faixa de controle em 2005 e 2006. Fonte: 3M OH&ESD, 2007.

Figura 6.25 – Representação gráfica do número de equipamentos de testes que geram aerossol a partir de solução com 2% de NaCl, fora da faixa de controle em 2005 e 2006. Fonte: 3M OH&ESD, 2007.

Figura 6.26 – Representação gráfica do número de equipamentos de testes que geram aerossol de DOP, fora da faixa de controle em 2005 e 2006. Fonte: 3M OH&ESD, 2007.

Analisando esses resultados, constata-se que a maioria dos equipamentos apresenta resultados dentro da faixa de controle estabelecida no programa; o número de equipamentos de teste com mais de duas leituras fora dos padrões de controle é maior quando utilizam cloreto de sódio, tanto em baixa como em alta

concentração, quando comparado com as leituras dos testes realizados com substâncias oleosas como DOP ou óleo de parafina. (3M OH&ESD, 2007)

Figura 6.27 – Representação gráfica do número de equipamentos de testes que geram aerossol de óleo de parafina, fora da faixa de controle em 2005 e 2006. Fonte: 3M OH&ESD, 2007.

6.3.4.3.2 Comparações entre o Moore's e TSI 8110 e 8130

Estudos comparativos com equipamentos da TSI 8110, 8130 e Moore's foram realizados por 3M OH&ESD (2004). Quatro equipamentos Moore's, 33 equipamentos TSI modelo 8110 e 23 equipamentos TSI modelo 8130 participaram desse estudo. As comparações foram feitas com testes realizados em placas de filtros fabricadas por Hollingsworth and Vose, referência HF-0513. Os testes foram realizados com número de uma a oito placas colocadas umas sobre as outras, de forma a abranger faixas de penetração compreendidas entre 0,3 e 30 % (leituras nos Moore's). Os resultados foram agrupados de forma que, no primeiro, foi possível comparar os equipamentos TSI modelo 8110 e Moore's e no segundo, os equipamentos TSI modelo 8130 e Moore's. Isso possibilitou a construção dos gráficos apresentados nas figuras 6.28 e 6.29. Em cada gráfico aparecem 8 pontos com valores de penetração. Nos eixos das abscissas aparecem os valores médios dos resultados obtidos nos testes realizados com os equipamentos TSI modelo 8110 (figura 6.28) e com os equipamentos TSI modelo 8130 (figura 6.29). Nos eixos das ordenadas são mostrados os valores médios dos resultados de penetração obtidos nos testes realizados nos equipamentos Moore's, com os

mesmos conjuntos de filtros utilizados nos testes com os equipamentos da TSI. Os oito pontos representam faixas de penetração esperadas para as várias classes de filtros para particulados utilizados em respiradores, independentemente da norma de ensaio utilizada. Os dados foram processados de modo a se conseguir, através de regressão matemática, equações que relacionem cada um dos equipamentos da TSI com o Moore's.

Figura 6.28 – Valores comparativos entre as percentagens de penetração inicial medidos no Moore's e no TSI 8110. Fonte: 3M OH&ESD, 2004.

Figura 6.29 – Valores comparativos entre as percentagens de penetração inicial medidas no Moore's e no TSI 8130. Fonte: 3M OH&ESD, 2004.

As equações eq.(6.2) e eq.(6.4) indicam os valores esperados de penetração de aerossol de cloreto de sódio nos equipamentos Moore's, em relação a valores de penetração obtidos nos equipamentos da TSI modelos 8110 e 8130, respectivamente. Os valores de R^2 , eq.(6.3) e eq.(6.5), coeficientes de determinação, designam o quão bem os dados se ajustam à regra de regressão. O R^2 varia de 0 a 1, e quanto mais próximo a 1 estiver, maior é o ajuste do modelo

$$\text{Moore's} = 0.7311 \times (8110) + 0.5083 \quad (6.2)$$

$$R^2 = 0.9993 \quad (6.3)$$

$$\text{Moore's} = 0.8848 \times (8130) - 0.0098 \quad (6.4)$$

$$R^2 = 0.9956 \quad (6.5)$$

Onde:

Moore's são valores de penetração esperados no equipamento Moore's.
8110 são valores de penetração medidos no equipamento da TSI 8110.

8130 são valores de penetração medidos no equipamento da TSI 8130.

R^2 é o coeficiente de determinação da regressão.

Os resultados obtidos nos testes realizados nos equipamentos TSI modelo 8130 possuem uma relação com os resultados dos equipamentos Moore's de aproximadamente 1:1, em todas as faixas de medições. Em média, os valores de penetração do Moore's foram 27% superiores aos valores de penetração medidos no TSI 8110; e 12% inferiores aos resultados do TSI 8130 (3M OH&ESD, 2004).

7 DISCUSSÃO

Os particulados existentes em ambientes de mineração e outros ambientes de trabalho podem ser perigosos à saúde humana, dependendo de fatores toxicológicos, dimensões, tempo de exposição e carga de trabalho do operador. Existem na literatura vários estudos sobre exposição de trabalhadores a particulados gerados em mineração de carvão. Devido à toxicidade do carvão, seu uso disseminado em todo o planeta desde os primórdios, e o fato de que grande parte de sua exploração se dá em minas subterrâneas, onde há pouca ou nenhuma ventilação natural, essa indústria tem sido muito estudada por pesquisadores em todo o planeta. Mais recentemente, vários estudos foram realizados sobre efeitos tóxicos e formas de controle de emissões de particulados de diesel. Davies (2004) faz uma boa síntese do conhecimento atual sobre esse tema. Por outro lado, existem poucas informações disponíveis sobre exposição e controle de emissões e de exposição a outros agentes químicos presentes em ambientes de mineração. Sobre o minério de ferro, muito comum na crosta terrestre, com grandes jazidas em exploração no Brasil, quase inexitem informações toxicológicas ou epidemiológicas. Poucos estudos têm sido desenvolvidos sobre exposição de trabalhadores em minas a céu aberto. É de se louvar iniciativas como as de Gruezner (2003) e Almeida (1999) que desenvolveram suas teses de mestrado nessas atividades de mineração.

Os filtros para particulados, diferentemente dos filtros para gases e vapores, podem ser utilizados para uma grande variedade de agentes químicos. Se bem projetado e produzido, um mesmo filtro pode ser utilizado para qualquer particulado, independente do tamanho das partículas presentes e de sua composição química.

No desenvolvimento de normas, a preocupação reinante tem sido a degradação do filtro durante o uso. Com a disseminação de filtros fabricados em microfibras de poliolefinas, carregados eletrostaticamente, as partículas com características oleosas passaram a ser motivos de preocupação devidos à sua degradação, principalmente à perda de eficiência da carga eletrostática. Por essa razão, todas as normas utilizadas para ensaios de filtros para particulados utilizados em respiradores requerem que esses sejam testados com substâncias oleosas, seja DOP ou óleo de parafina. Mais recentemente, essas normas ainda requerem que o

filtro seja carregado com quantidades definidas desses aerossóis durante o ensaio. Por exemplo, na norma norte americana, o teste é feito com concentração de até 200 mg/m^3 na câmara de ensaio e o ensaio definido na norma EN 143 (CEN, 2006) requer um fluxo de 20 mg/m^3 . A norma brasileira NBR 13697 (ABNT, 1996) é uma das poucas que ainda possuem, como requisito de ensaio, resultados de penetração registrados em menos de 1 minuto de teste.

O carregamento do filtro com partículas do agente de ensaio, durante o teste, é um diferencial importante das normas européia e norte americana, e deve ser adotado também pela futura norma ISO, atualmente em discussão. Porém, quando se comparam as concentrações de ensaio e as quantidades de partículas que devem contatar o filtro durante o ensaio, com as situações tipicamente encontradas em ambientes de mineração a céu aberto, conclui-se que os testes são muito rigorosos. Por exemplos: concentrações de particulados oleosos de 20 mg/m^3 (EN 143:2006) ou 200 mg/m^3 (42 CFR 84) na câmara de testes versus concentração de $100 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ encontradas em minerações a céu aberto; 120 mg (EN 143:2006) ou 200 mg , (42 CFR 84) de carregamento do filtro durante o teste versus cerca de apenas $100 \text{ } \mu\text{g}$ de carregamento real nesses ambientes, considerando um dia de 8 horas trabalho com exposição a $100 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, e frequência respiratória de 20 l/min .

Em ambientes fechados, ou minerações subterrâneas, as concentrações de partículas oleosas poderão atingir valores próximos a 2 mg/m^3 . Nesses casos, a carga eletrostática do filtro pode ser degradada em tempo de uso inferior a 8 horas de trabalho, portanto é recomendado o uso de filtros aprovados para partículas sólidas e líquidas, cujos testes incluem partículas oleosas como agente de ensaio.

Com relação aos instrumentos utilizados para testes de filtros para particulados, os estudos disponíveis indicam que existe uma boa correlação entre eles.

Resultados de penetração obtidos com os equipamentos da TSI modelos 8110 e 8130 são correlacionáveis com os resultados obtidos nos equipamentos Moore's. Essa relação chega a ser praticamente 1:1 na comparação do Moore's com o modelo TSI 8130, de acordo com regressão matemática feita por 3M OH&ESD (2004). Apesar do número limitado de valores para realizar tal comparação (8 pontos), eles representam as faixas de penetração comuns a filtros para particulados utilizados em respiradores.

Quando operados de acordo com os parâmetros definidos na norma EN 143 (CEN, 2006) ou NBR 13697 (ABNT, 1996), os dois instrumentos de testes produzem

resultados muito próximos, ou seja, dentro da faixa de 25% de variação em torno da média, variação esperada para testes realizados no mesmo equipamento.

O equipamento da TSI possui algumas vantagens em termos de facilidades de operação e possibilita a utilização de aerossol sólido (não oleoso) e líquido (oleoso) com uma simples mudança do nebulizador. Essa característica do instrumento de teste permite a realização dos dois ensaios de penetração definidos para aprovação de filtros para particulados, no mesmo equipamento.

8 CONCLUSÕES

Relativo a normas de ensaio adotadas em países europeus, Estados Unidos e Brasil, pode-se concluir que:

- Os métodos de testes especificados pela NBR 13697 (ABNT, 1996) encontram-se defasados em relação aos métodos especificados nas normas européia EN 143 (CEN, 2006) e norte-americana 42 CFR 84 (Estados Unidos, 1995). As duas normas requerem que os testes sejam executados com carregamento do filtro pelo agente de ensaio. Na norma brasileira, a leitura da penetração é feita no primeiro minuto de teste, sem tempo suficiente para que ocorra o carregamento do filtro com as partículas. Alguns filtros eletrostáticos não resistem a tal carregamento, e podem ter a eficiência das cargas eletrostáticas degradadas durante o uso. Esse fenômeno ocorre com maior frequência se as partículas que chegam ao filtro apresentarem características oleosas.

Quanto aos equipamentos utilizados para testes de filtros para particulados, conclui-se que:

- Estudos comparativos, realizados com o equipamento Moore's e equipamentos da TSI, demonstram uma relação de praticamente 1:1 em todos os níveis de penetração, quando se utiliza uma solução aquosa de 2% de NaCl no TSI e uma solução de 1% no equipamento Moore's. Este fato permite a utilização de um ou outro equipamento para realização dos ensaios, sem a necessidade de alterar os valores especificados pelas normas ABNT.
- Existe boa repetitividade de resultados de ensaios realizados em um mesmo equipamento de teste e em equipamentos diferentes, porém, do mesmo modelo. Os equipamentos da TSI, modelo 8130, apresentaram resultados com melhor repetitividade nos ensaios realizados com óleo de DOP, comparativamente aos resultados com NaCl.

As informações disponíveis sobre características dos particulados presentes em um ambiente de mineração levam às seguintes conclusões:

- Particulados em operações a céu aberto possuem diâmetro médio mássico acima de 2,5 μm . Considerando que o diâmetro médio das partículas utilizadas nos testes é de aproximadamente 0,4 μm , dimensão bem mais penetrante que 2,5 μm , é de se esperar que filtros aprovados para uso contra particulados tenham eficiência mais alta que aquela demonstrada nos ensaios, quando utilizados em ambientes de mineração.
- As características químicas dos aerossóis são bem variadas, pois dependem do material que está sendo explorado, do processo de exploração e tratamento utilizados. Particulados gerados no processo de combustão parcial de diesel, os quais possuem características oleosas, também estão presentes nesses ambientes. Esses particulados, além de perigosos à saúde do trabalhador se sua concentração ultrapassar 350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, podem ainda afetar a vida útil dos filtros. Concentrações superiores a 350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ foram encontradas em minerações subterrâneas. Em minerações a céu aberto, a ventilação natural e boas condições de dispersão atmosférica são fatores que diminuem as concentrações desses particulados. Porém, não foi possível concluir se a diluição e ventilação naturais são suficientes para tornar ambientes de minerações a céu aberto saudáveis para respiração humana e seguros para uso de um filtro que não seja resistente a particulados oleosos.

Quanto à substituição de equipamentos Moore's por equipamentos da TSI modelo 8130, esta pesquisa demonstrou que isto é viável e recomendada, pois:

- O equipamento da TSI modelo AFT 8130 tem sido utilizado na Europa, Estados Unidos, Ásia e Oceania;
- Atende os requisitos definidos nas normas européia e norte americana;
- Os resultados de testes obtidos com o TSI 8130 possuem uma relação próxima a 1:1 com o Moore's;

- Pelo menos quatro fabricantes de respiradores e filtros localizados no Brasil possuem e utilizam esse equipamento para testes de filtros para particulados;
- Esses mesmos fabricantes não possuem ou descontinuaram a utilização do equipamento Moore's;
- A FUNDACENTRO, único laboratório credenciado pelo Ministério do Trabalho do Brasil para realização de testes com respiradores e filtros, também possui equipamento TSI modelo 8130;
- O equipamento possibilita a realização de ensaios tanto com partículas secas de cloreto de sódio como partículas oleosas;
- A operação do equipamento é bem mais simples que do Moore's e permite obtenção de resultados com mais rapidez, dentro de uma faixa de variação em torno de 25 % da média (idêntica a variação obtida no equipamento Moore's);
- A substituição permitirá um melhor intercâmbio entre os laboratórios brasileiros;
- O usuário de respirador, trabalhador da indústria de mineração, se beneficia com o fato de que novas tecnologias podem ser adaptadas ao produto nacional com mais rapidez, trazendo mais proteção e menos desconforto no uso do equipamento de proteção respiratória.

Dificuldades encontradas para a realização da pesquisa:

- Existem poucas informações disponíveis sobre características físicas e químicas de particulados presentes em minerações a céu aberto de grande porte existentes no Brasil, tais como ferro, rocha fosfática, cobre, bauxita, entre outras.
- Faltam também estudos mais detalhados sobre toxicologia e epidemiologia desses particulados e outros agentes químicos gerados nessas minerações.
- Informações sobre material particulado com características oleosas, gerados pela combustão incompleta de óleo diesel, ou por outro processo utilizado em minerações, são desconhecidas no Brasil. Essas informações, disponíveis em outros países, indicam que existe algumas preocupações quanto a inalação desses particulados e seu efeito deletério sobre a vida útil de filtros utilizados em respiradores.

Propostas para futuros trabalhos:

Não foram estudados, no presente trabalho, os métodos de controle de exposição de trabalhadores a agentes químicos praticados pela indústria de mineração, entre os quais incluem atualização tecnológica, substituição de matérias primas, sistemas de ventilação e uso de equipamento de proteção respiratória.

Alguns temas mais específicos, que podem ser abordados em futuros trabalhos são:

- Avaliação de atividades que requeiram o uso de proteção respiratória e verificação da eficiência do respirador utilizado durante o uso. Existem protocolos bem definidos para realização de estudos de fator de proteção em ambientes de trabalho que facilitam essa avaliação e permitem fazer comparações com estudos já realizados.
- Tempo de uso e durabilidade de respiradores e filtros. A eficácia do uso de um equipamento de proteção respiratória cai drasticamente, se esse não for utilizado ou mantido de forma adequada. Através de observações de campo e com utilização de ferramentas estatísticas é possível verificar se os respiradores são corretamente utilizados.
- Avaliação da eficácia do uso de respiradores, considerando fatores relacionados à vedação, tais como: colocação e ajuste do respirador sobre a face, cuidados e manutenção, uso de barbas, etc.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

3M OCCUPATIONAL HEALTH AND ENVIRONMENTAL SAFETY DIVISION. **2003 Automated filter test instrument - Global round robin review**. Relatório interno. Saint Paul, MN, USA, 2004. ⁶

_____. **2006 Automated filter test instrument - Global round robin - Annual report**. Relatório interno. Saint Paul, MN, USA, 2007. ⁷

ALMEIDA I.T. **A poluição atmosférica por material particulado na mineração a céu aberto**. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo 1999.

Associação Brasileira de Higienistas Ocupacionais. **Limites de Exposição Ocupacional (TLVs®) para substâncias químicas e agentes físicos & Índices biológicos de exposição (BEIS®) edição 2006 em português, traduzida e impressa por ABHO**. Associação Brasileira de Higienistas Ocupacionais. São Paulo, 2006

American Conference of Governmental Industrial Hygienists. **Silica, Crystalline - Quartz TLV® documentation**. USA, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12543**: Equipamentos de proteção respiratória – Terminologia. Rio de Janeiro, 1999.

_____. **NBR 13697**: Equipamentos de proteção respiratória – Filtros mecânicos. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR 13698**: Equipamentos de proteção respiratória – Peça semifacial filtrante para partículas. Rio de Janeiro, 1996.

⁶ Documento acessível mediante autorização do Dr. Michael Runge, diretor técnico da 3M Company.

⁷ Documento acessível mediante autorização do Dr. Michael Runge, diretor técnico da 3M Company.

BRASIL. Presidência da República. **Lei nº. 6514** de 22 de dezembro de 1977 altera do capítulo V, título II da Consolidação das Leis do Trabalho, relativo à segurança e medicina do trabalho. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L6514.htm. Acesso em: janeiro 2007.

_____. Ministério do Trabalho e Emprego. Portaria GM nº. 3214, de 8 de junho de 1978. **NR-6 – Equipamento de proteção individual - EPI**. Normas regulamentadoras de Segurança e Saúde no Trabalho. Apresenta varias atualizações, sendo a ultima a Portaria nº. 194, de 22 de dezembro de 2006. Disponível em: http://www.mte.gov.br/legislacao/normas_regulamentadoras/nr_06.pdf. Acesso em: novembro 2006.

_____. Ministério do Trabalho e Emprego. Portaria nº. 25, de 29 de dezembro de 1994, dando a redação final a Portaria GM nº. 3214, de 8 de junho de 1978. **NR-9 – Programa de prevenção de riscos ambientais**. Normas regulamentadoras de Segurança e Saúde no Trabalho. Disponível em: http://www.mte.gov.br/legislacao/normas_regulamentadoras/nr_09.pdf. Acesso em: janeiro 2007.

_____. Ministério do Trabalho e Emprego. Portaria GM nº. 3214, de 8 de junho de 1978. **NR-15 – Atividades e operações insalubres**. Normas regulamentadoras de Segurança e Saúde no Trabalho. Disponível em: http://www.mte.gov.br/legislacao/normas_regulamentadoras/nr_15.pdf. Acesso em: março 2007.

_____. Ministério do Trabalho e Emprego. Portaria GM nº. 3214, de 8 de junho de 1978. **NR-22 – Segurança e saúde ocupacional na mineração**. Apresenta varias atualizações, sendo a ultima a Portaria nº. 63 de 02 de dezembro de 2003. Normas regulamentadoras de segurança e saúde no trabalho. Disponível em: http://www.mte.gov.br/legislacao/normas_regulamentadoras/nr_22.pdf. Acesso em: novembro de 2006.

BARRETT, L.W.; ROUSSEAU, A.D.; **Aerosol Loading Performance of Electret Filter Media**. American Industrial Hygiene Association Journal 59, p. 532–539, USA, 1998.

BOSTOCK, G. **Estudo comparativo entre resultados de testes de filtros para particulados, com óleo de parafina, realizado entre laboratórios europeus.** Documento interno 3M Company. Aycliffe, 12 p. Inglaterra, 1990. *⁸

CADALBERT, M. R.; SIMPSON, K. L. **Planilhas e documentos utilizados para registro, documentação e análise de dados acumulados nos programas “round robin” no período compreendido entre 1990 e 2006.** Saint Paul, MN, USA, 2006. *⁹

CHEN, C.C.; HUANG, S.H. **The Effect of Particle Charge on the Performance of an Electret Filtering Facepiece.** American Industrial Hygiene Association Journal 59, p.227-233, USA, 1998.

CHEN, C.W. et al. **Penetration of 4.5 nm to 10 µm aerosol particles through fibrous filters.** In: Filtration paper, AIHCE Poster Session, Chicago, 2006.

COMISSÃO EUROPEIA DE NORMALIZAÇÃO. **EN 143:** Respiratory protective devices – particle filters. Requirements, testing, marking. Incorporating corrigenda Nos. 1 and 2 and Amendment No. 1., Inglaterra, 2006.

_____. **EN 149:** Respiratory protective devices – filtering facepieces. Requirements, testing, marking. Inglaterra, 2001.

DAVIES, B. The control of diesel particulates in underground coal mining. **Tese para obtenção de título de PhD na Universidade de Victoria,** Australia, 2004.

ESTADOS UNIDOS. Code of Federal Regulations. Mine Safety and Health Administration. **30 CFR Part 11. Subpart K: Non powered air-purifying particulate respirator.** Estados Unidos, 1978A.

_____. Code of Federal Regulations. Mine Safety and Health Administration. **30 CFR Part 57,** USA, 1978B.

⁸ Documento acessível mediante autorização do Dr. Michael Runge, diretor técnico da 3M Company.

⁹ Documento acessível mediante autorização do Dr. Michael Runge, diretor técnico da 3M Company.

_____. Code of Federal Regulations. Department of Health and Human Services. Public Health Service. **42 CFR Part 84. Subpart K**: Non powered air-purifying particulate respirator. Estados Unidos, 1995.

GRUEZNER, G. **Avaliação de poeira de sílica: um estudo de caso em uma pedreira na região metropolitana de São Paulo**. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

HANEY, R.A; SASEEN G.P; WAYTULONIS R.W. **An Overview of Diesel Particulate Exposures and Control Technology in the U. S. Mining Industry**. Mine Safety and Health Administration and Robert W. Waytulonis U.S. Bureau of Mines, USA, 2000.

HINDS, W.C. **Aerosol Technology**. Properties, behavior, and measurement of airborne particles. Library of congress cataloging in publication data. Estados Unidos, 1982.

JANSSEN, L.L. et al. Efficiency of degraded electret filters: Part I – Laboratory testing against NaCl and DOP before and after exposure to workplace aerosols. **Journal for International Society for Respiratory Protection** p. 71-80, 2003

JANSSEN, L.L. et al. Efficiency of degraded electrets filters: Part II – Field test against workplace aerosols. **Journal for International Society for Respiratory Protection** p. 81-90, 2003

JONES, T; MORGAN, A; RICHARDS, R. Primary blasting in a limestone quarry: physicochemical characterization of the dust clouds. **Mineralogical Magazine**; April 2003; v. 67; no. 2; p. 153-162. Britain and Ireland 2003.

MARTIN JR. S.B; MOYER E.S. Electrostatic Respirator Filter Media: Filter Efficiency and Most Penetrating Particle Size Effects. **Applied Occupational and Environmental Hygiene**, V. 15(8), p. 609–617, USA, 2000.

MCDONALD, J.D. et.al. Characterization of Fine Particle Material in Ambient Air and Personal Samples from an Underground Mine. **Aerosol Science and Technology**, volume 36, issue 11, p. 1033-1044. USA 2002.

MOYER, E.S.; BERGMAN, M.S. Electrostatic N-95 Respirator Filter Media Efficiency Degradation Resulting from Intermittent Sodium Chloride Aerosol Exposure. **Applied Occupational and Environmental Hygiene**, Volume 15(8), p. 600 –608, USA, 2000.

SIMPSON, K.L. **Advances in filtration and separation technology**. Library of congress catalog card number 91-75445. Houston USA 1991.

SIMPSON, K.L. **1994 Round robin results - Model 8110 and Moore's. 3M Occupational Health and Environmental Safety Division. Internal report**. Saint Paul, MN, USA, 1995.¹⁰

SIMPSON K.L; IVERSON S.G. A Comparison of two NaCl test systems used for measuring filter efficiency. **Particulate science and technology**. Saint Paul, MN, USA, 1991.

TORLONI, M. Equipamento para teste de penetração de cloreto de sódio em filtros para respiradores: construção, obtenção de curva de calibração e avaliação de desempenho. **Tese (Livre-docência) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo**. São Paulo, 1985.

TORLONI, M. (Coord.). Programa de proteção respiratória: recomendações, seleção e uso de respiradores. São Paulo: **FUNDACENTRO**, 2002.

TORLONI, M; VIEIRA A.V. **Manual de proteção respiratória**. Associação Brasileira de Higienistas Ocupacionais. São Paulo, 2003.

¹⁰ Documento acessível mediante autorização do Dr. Michael Runge, diretor técnico da 3M Company.

TSI INCORPORATED. CertiTest® Model 8127/8130, **Automated Filter Tester, Operation and service manual**. USA, 2006. Disponível em: www.tsi.com/documents/1980207h-8127-30.pdf. Acesso em: outubro 2006.