ISSN: 2175-1897

Formação e gestão inovadoras na era da transformação digital: abrangência, significados e relações.

REGENERAÇÃO DE CARTUCHOS USADOS EM RESPIRADORES SEMIFACIAIS (SF)

Cleber Corrêa Vieira[1], Francisco Tadeu Degasperi[2], Silvia Pierre Irazusta[3]

Resumo – Este trabalho tem o objetivo de comprovar que a regeneração do carvão ativado granulado (GAC) dos cartuchos utilizados em respiradores semifaciais (SF), que filtram vapores de compostos orgânicos (VOC), permitindo-se a sua reutilização ou reciclagem de seus componetes. Foi realizado um ciclo de ensaios: adsorção de VOC de tolueno, dessorção com vapor d´água e secagem em estufa, por meio de um protótipo experimental. Para a comparação dos resultados, foi estabelecida a equação do índice de Recuperação (IR) e capacidade de adsorção, denominado fator Ca, sendo que os valores obtidos foram crescentes e superiores a 97%, para os cartuchos regenerados e o fator Ca obtido foi de 110,2 $mg.g^{-1}$ a concentração de 680 ppm de tolueno. A eficiência foi também atribuída ao fato do cartucho regenerado ter sido submetido a secagem em estufa a 150 ºC, o que possibilitou a retirada de toda a umidade. Os resultados obtidos, com coeficiente de variação (CV) inferior a 10%, permitem dizer que é possível a regeneração do GAC destes cartuchos

Palavras-chave: GAC, Sustentabilidade, Adsorção, Dessorção.

Abstract - This paper has the objective of proving that the regeneration of granulated activated carbon (GAC) of the cartridges used in halfmasks respirators, which filters vapors of organic compounds (VOC), allowing their reuse or recycling of their components. A cycle of tests was carried out: adsorption of toluene VOC, desorption with water vapor and oven drying, by means of an experimental prototype. For the comparison of the results, the equation of the Recovery Index (IR) and adsorption capacity, denominated factor Ca, was established, and the values obtained were increasing and above 97% for the regenerated cartridges and the obtained Ca factor was 110.2 $mg.g^{-1}$ of toluene flow of 680 ppm. The efficiency was also attributed to the fact that the regenerated cartridge was dried in an oven at 150 ºC, which allowed the removal of all moisture. The results with coefficient of variation (CV) less than 10% allows the GAC regeneration of theese cartridges is possible.

Keywords: GAC, Sustainability, Adsorption, Dessorption.

[1] Aluno mestrando do Programa de Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos da Unidade de Pós-Graduação, Pesquisa e Extensão do Centro Paula Souza.Contato: cleber.cv@uol.com.br
[2] Professor co-orientador do Programa de Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos da Unidade de Pós-Graduação, Pesquisa e Extensão do Centro Paula Souza. Contato: ftd@fatecsp.br
3 Professora da Faculdade de Tecnologia José Crespo Gonzales, Sorocaba, SP e orientadora do Programa de Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos da Unidade de Pós-Graduação, Pesquisa e Extensão do Centro Paula Souza. Contato: silvia.pierre@gmail.com

1. Introdução

Os compostos *Volatile Organic Compounds* (VOC) são vapores orgânicos que emanam de compostos sólidos e de líquidos e estão presentes em uma variedade de produtos químicos, os quais apresentam efeitos danosos à saúde do trabalhador, em exposição de períodos curtos e outros após um período prolongado (ACGIH, 2018).

Nos ambientes fechados e com pouca ventilação, a concentração de VOC atinge facilmente valores acima do limite de tolerância preconizado em lei (BRASIL, 1978), expondo o trabalhador a doenças ocupacionais (ALGRANTI et al., 2010). Na atmosfera do ambiente de trabalho os VOC são emanados por uma variedade de compostos químicos orgânicos, que são muito utilizados como matéria prima em centenas de produtos, como tintas, removedores, solventes e graxas assim como de produtos utilizados nas residências.

Para realizar a avaliação ambiental, as indústrias brasileiras, cujos trabalhadores estão expostos a VOC, os profissionais do Serviço Especializado em Segurança e Medicina do Trabalho (SESMT) e da área de Higiene Ocupacional (HO), bem como empresas especializadas em HO, utilizam procedimentos de acordo com as Normas de Higiene Ocupacional (NHO) da FUNDACENTRO, para seguir as metodologias científicas específicas definidas pela *American Conference of Governmental Industrial Hygienists* (ACGIH), para a avaliação da concentração de VOC na atmosfera do trabalho e também na avaliação pessoal. O objetivo é de se avaliar as concentrações dos VOC, às quais o trabalhador esteve exposto naquela atividade é superior ao limite de tolerância (LT) preconizado em lei. Ao final desta análise os peritos, de posse do relatório de análises químicas do Laboratório de HO, emitem um Laudo Técnico com os valores das concentrações dos compostos químicos, e comparam com os LT encontrados na legislação nacional ou internacional vigente, controlando o nível de exposição do ambiente de trabalho (RIOS, 2016).

A exposição aos VOC pode causar efeitos agudos e crônicos ao organismo, que podem ter intensidade aumentada na presença de fatores agravantes, como problemas respiratórios prévios, como asma, hábitos alimentares ou tabagismo. Em altas concentrações, muitos VOC são narcóticos potentes, e podem deprimir o sistema nervoso central (SNC). Exposições prolongadas podem também levar a irritação dos olho e trato respiratório, e causar reações de sensibilidade envolvendo o olho, pele e pulmões.

Segundo Torloni e Vieira (2003), a Norma Regulamentadora nº 09 (BRASIL, 1978) exige das empresas, a elaboração do Programa de Prevenção de Riscos Ambientais (PPRA). Neste programa, necessariamente, há de se constar os valores de concentrações dos produtos químicos presentes na atmosfera do trabalho, encontrados na altura da respiração dos trabalhadores expostos. Para tanto, a FUNDACENTRO publicou a Norma de Higiene Ocupacional (NHO) nº 07, que é utilizada para aferir instrumentos científicos para a avaliação da dose pessoal de contaminantes, como a bomba gravimétrica com tubo e cassete de plástico a ser fixado na lapela do trabalhador. Este cassete acondiciona um disco de carvão ativado em seu interior ou é conectada a um tubete (ampola de vidro com aberturas nas extremidades) de carvão ativado ou se utilizam mostradores passivos que não necessitam de bomba gravimétrica. Este mostrador semelhante a um crachá de lapela capaz de absorver os VOC pelo contato do carvão ativado presente no disco interno do produto. Este instrumento científico simula a respiração humana e deve ficar com o usuário durante a sua jornada de trabalho. Após a coleta de amostras, o cassete com disco de carvão ativado é enviado a um laboratório químico especializado em HO, para as

análises de determinação das concentrações dos componentes químicos a que os trabalhadores estiveram expostos (SAAD e FANTAZINI, 1994).

Estes valores são inseridos nas tabelas do PPRA e assim o profissional do SESMT da empresa, define a especificação técnica de qual respirador o usuário deve utilizar, fará o cálculo do Fator de Proteção Requerido (FPR) segundo a Instrução Normativa nº 01 (FUNDACENTRO, 2016), que é o Programa de Proteção Respiratória (PPR) e irá estabelecer um valor que será comparado com os valores da tabela do Fator de Proteção Atribuído (FPA) a cada tipo de respirador, que varia de 10 a 10.000, dependendo do tipo de respirador. Por exemplo, ao respirador semifacial filtrante (PFF) atribui-se o valor 10, semifacial com cartuchos (SF) também o valor 10, facial inteira (F) o valor 100, assim crescente, até a máscara autônoma (MA) que é o equipamento de proteção respiratória (EPR) de maior valor, ou seja, 10.000.Também há a limitação do uso dos respiradores quando o limiar de odor do contaminante tóxico é desconhecido ou de valor superior ao seu Limite de Tolerância (LT). Também deve se observar o valor de Concentração Imediatamente Perigosa a Vida e Saúde (IPVS), que estabelece concentrações perigosas que podem levar ao trabalhador exposto a óbito (TORLONE; VIEIRA, 2003).

Baseado no contexto acima, este trabalho teve o objetivo de comprovar a possibilidade de regeneração do GAC dos cartuchos utilizados em respiradores semifaciais (SF).

2. Referencial Teórico

Com relação às ocorrências associadas à manipulação de compostos variados, dados da Organização Mundial da Saúde de 2007, estimam que ocorrem no Brasil, cerca de 12.000 casos diários de intoxicação e como a previsão é de uma morte a cada 1.000 casos, a conclusão é que cerca de 12 brasileiros morrem intoxicados anualmente por medicamentos e/ou outras substâncias químicas todos os dias, o que exige medidas preventivas e corretivas.

Os compostos conhecidos como VOC são produtos químicos que participam de reações fotoquímicas na atmosfera, que têm pressões de vapor maior que 10 Pa à temperatura de 250 ºC, cuja temperatura de ebulição seja acima de 250ºC à pressão atmosfera e são compostos com 15 átomos de carbono ou menos (KLINDERS ET AL., 2007). Estes compostos também são conhecidos pela sua toxicidade, especialmente quando inalados, via pela qual são rapidamente absorvidos, causando efeitos sistêmicos importantes, tanto pela exposição aguda, como crônica (KLAASSEN, 2012).

Atualmente, por recomendação dos higienistas ocupacionais (ABHO), as empresas, cujo processo de produção envolva VOC, devem adotar medidas de ação, quando ultrapassado o limite de ação, que corresponde à metade do valor do limite de tolerância, para neutralizar a potencial toxidade dos agentes químicos na atmosfera de trabalho. As recomendações consistem na adoção de equipamentos de proteção coletiva (EPC), medidas administrativas como rodizio de função e uso de equipamentos de proteção respiratória (EPR) adequados para minimização do risco químico presente na forma de aerodispersóides, vapores ou gases (SAAD; FANTAZINI, 1994).

Segundo Brinques (2005) um tipo comum e econômico de material que tem grande afinidade com compostos orgânicos é o CAG. Este composto é indicado como adsorvente para a filtração de VOC. Os GACs são materiais sólidos dispostos em grãos, obtidos a partir de carbonáceos e utilizados como elemento tecnológico adsorvente nos equipamentos destinados à proteção respiratória individual.

O material carbonáceo que constitui o carvão ativado contém uma grande quantidade de poros de diversos tamanhos, o que lhe confere uma elevada área superficial interna e consequentemente alta capacidade de retenção de contaminantes dissolvidos no estado gasoso através do processo de adsorção, podendo o material ser de origem vegetal. A estrutura do carvão ativado consiste de grafites microcristalinos elementares, mas a sua disposição é aleatória e os espaços entre os cristais dão origem aos poros.

Os produtos nos processos de adsorção, são o adsorvente, que é o material sólido empregado para a separação de uma ou mais substâncias da fase fluida; e o adsorbato, que é a substância a ser adsorvida. A adsorção pode ocorrer de duas maneiras: química ou física. A adsorção pode ser física (fisiossorção), causada principalmente por forças de Van der Walls, onde há a interação dipolo-dipolo e forças de polarização envolvendo dipolo induzido ou forças eletrostáticas entre as moléculas do adsorbato e os átomos que compõem a superfície do adsorvente, ou seja, as moléculas encontram-se fracamente ligadas à superfície e o processo resulta adsorção com baixo aquecimento, podendo formar camadas moleculares sobrepostas.

Para Ying (2015), GAC é um versátil absorvente devido a sua enorme área superficial para retenção de moléculas de VOC e sua estrutura de poros que possuem alto grau de contato e retenção superficial, motivo da sua escolha técnica e comercial para uso em cartuchos de EPRs com a finalidade de retenção de VOC por adsorção

O carvão utilizado neste EPR é de origem vegetal (madeira, turfa, caroço de azeitona, casca de coco, etc.), passando depois pelo processo de ativação, e eventualmente tratamento químico final. A porosidade e as características absortivas de determinado grau de carvão ativado são dependentes da matéria-prima utilizada e do tipo de ativação e tratamento final a que ela é sujeita (LEGNER, 2017).

A descontaminação deste carvão contido nos EPR, permitiria o de reuso deste material para composição de novo cartucho, oferecendo uma alternativa ambientalmente amigável para o manejo deste material.

3. Método

Foram utilizados cinco cartuchos do mesmo lote, destinados a filtração de vapores orgânicos (VO), de respirador SF, que contém GAC em sua composição, conforme ilustra a Figura1.

Figura 1: Respirador semifacial (SF)

Fonte: Air Safety

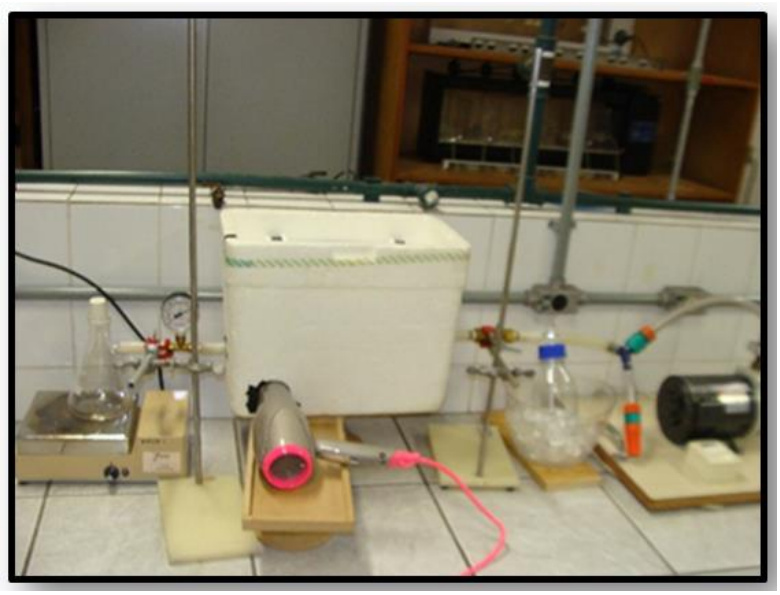
Foi desenvolvido um protótipo experimental, conforme ilustra a Figura 2 para a realização dos ensaios de adsorção e dessorção dos vapores de VOC, utilizando-se tolueno 99,5% vol., que agiu como adsorbato no sistema.

No ensaio de adsorção, o solvente tolueno ao volume de 100 mL, foi inserido no kitassato e submetido ao aquecimento a temperatura de 120º C e posteriormente a mistura de ar e VOC foi succionada pela ação da bomba de vácuo, em fluxo constante de 60 $L.min^{-1}$ a pressão de 680 mmHg, em direção ao cartucho colocado previamente no dispositivo metálico. Após todos os poros e superfície do GAC adsorverem os VOC pelo mecanismo de fisiossorção, houve o desprendimento das primeiras gotículas no tubo de vidro do condensador. Neste instante o ensaio foi interrompido e retirado o cartucho saturado do dispositivo metálico e posto no dissecador, para que houvesse o equilíbrio térmico. Após 15 min., o cartucho foi pesado na balança analítica para a obtenção da massa, denominada m_1.

Para o ensaio de dessorção, foi inserido em outro kitassato, o volume de 200 mL de água, que foi submetido ao aquecimento a temperatura de 110 ºC. Foi acionada a bomba a vácuo para manter um fluxo constante de 60 $L.min^{-1}$ a pressão de 640 mmHg, da mistura ar e vapor d'água de UR superior a 60%, em direção ao cartucho previamente adsorvido com tolueno. Após a passagem desta mistura pelo cartucho, observou-se as primeiras gotículas condensadas de tolueno e posteriormente a formação de gotículas de água, que não são missíveis e são visualmente maiores que as do tolueno. Manteve-se esse fluxo de vapor d'água por 30 minutos.

Após ser submetido a este ensaio de dessorção, o cartucho foi retirado e inserido em estufa a temperatura de 150 ºC por 12 horas e posteriormente colocado no dissecador e medida a sua massa, denominada m_2. Agora, considerado regenerado, o cartucho foi novamente submetido ao ensaio de adsorção nos mesmos parâmetros do cartucho novo, a fim de se fazer a análise comparativa, para a obtenção do Índice de Regeneração (IR) e sua capacidade adsortiva (Ca).

Figura 2: Protótipo experimental



Fonte: Autor

Foram calculados 15 valores de Índices de Regeneração (IR) para os cinco cartuchos submetidos a 04 ciclos de ensaio experimental: adsorção, dessorção e secagem em estufa, conforme a Equação 1:

$$IR = \sum_{i=1}^{15} 100 - \left\{\frac{(100.|Mvoc(i) - Mvoc(i+1))|}{Mvoc(i)}\right\} [\%]$$

Eq.1

Onde:

IR = índice de regeneração do GAC do cartucho (%)
Mvoc= massa de VOC do cartucho saturado (g)
i = cartucho (regenerado do 1º ao 4º ciclo de ensaios)
i+1 = mesmo cartucho (só que já regenerado e dessorvido)

Para calcular o valor da capacidade adsortiva do GAC dos cinco cartuchos testados, visto que todos eles possuem o mesmo formato de GAC, pois são do mesmo lote do fabricante Air Safety, foi desenvolvida a Equação 2:

$$Ca = \sum_{i=1}^{20} \frac{|Mvoc(i)|}{Mgac} \; [mg.g^{-1}]$$

Eq. 2

Onde:

Ca = capacidade adsortiva de VOC do cartucho ($mg.g^{-1}$)
Mvoc = massa de solvente adsorvida no cartucho (g)
M_{gac} = massa do carvão ativado após ser retirado do cartucho (g)
i = número de reutilização do cartucho

4. Resultados e Discussão

Aplicando-se a equação descrita acima nos 5 cartuchos, submetidos a 3 ciclos experimentais, obteve-se os dados de IR_m apresentados na Tabela 1:

Tabela 1: Índice de Regeneração (IR)

IR_m (%)	**Média**	**Desvio Padrão**
IRm_1	89,55	3,56
IRm_2	97,93	1,49
IRm_3	98,52	1,73

Fonte: Autor

O valor de IR_m (95,33 ± 2,26) % com coeficiente de variação (CV) de 6,13%, o que foi considerado satisfatório dentro dos padrões estatísticos (DEVORE, 2011).

Tabela 2: Capacidade adsortiva (Ca) de VOC pelo GAC dos cartuchos ensaiados

Ca ($mg.g^{-1}$)	**Média**	**Desvio Padrão**
Ca_{1m}	102,5	0,01
Ca_{2m}	113,2	0,04
Ca_{3m}	112,0	0,01
Ca_{4m}	113,3	0,04

Fonte: Autor

Efetuando a média dos valores Ca da tabela 2, obteve-se o valor de Ca_m (110,25 ± 0,02) mg.g-1 , o que representa a capacidade de adsorção de VOC pelo GAC dos cinco cartuchos testados nas condições de temperatura da mistura ar mais VOC de 120 ºC , pressão de 680 mmHg, concentração do VOC de 680 ppm e UR da mistura de 51 %.

Segundo Lilo-Ródenas et al. (2006), os carvões ativados de uso comercial conhecidos possuem capacidade de adsorção de VOC em valor máximo de 190 $mg.g^{-1}$ a concentração de tolueno de 200 ppm, o que deduzimos que quanto menor a concentração de VOC, maior será a sua capacidade adsortiva, pois nesta condição, estima-se que haverá a ocupação de todos os microporos, mesoporos e poros (IUPAC, 2011) que compõem a enorme área superficial do GAC, que varia entre 300 a 1.200 m^2 , de acordo com o formato e matéria prima do GAC (BRUM ET AL., 2008).

5. Considerações finais

Estabeleceu-se o Índice de Regeneração (IR), que é a relação entre a massa de tolueno adsorvida no ensaio inicial com o cartucho novo, comparado com o cartucho regenerado, que foi submetido ao ciclo de ensaios: adsorção de VOC tolueno, dessorção com vapor d'água e secagem em estufa. Os valores de IR obtidos para cada cartucho foram crescentes e superiores a 97 %, com coeficiente de variação (CV) de 6,23%.

Determinou-se a capacidade de adsorção de VOC, denominado fator Ca médio, Ca_m (110,25 ± 0,02) $mg.g^{-1}$, ao fluxo da mistura ar mais tolueno de 60 $L.min^{-1}$ com concentração de tolueno de 680 ppm e UR de 51 %, cujo método poderá ser utilizado para estudos posteriores, onde se poderá fazer uma correlação entre a Ca e a superfície do GAC e o tempo de saturação, pois nestas condições, estimou-se que quanto maior a concentração de VOC, menor será a sua Ca.

Para uma condição de 10.000 unidades anuais de cartuchos VO para respirador SF, do modelo utilizado nos ensaios, comercializados pelo fabricante Air Safety, com esta proposta apresentada, seria evitado o descarte dos seus componentes ao meio ambiente, considerando-se 10.000 cartuchos comercializados anualmente, nas quantidades inseridas na Tabela 3.

Tabela 3: Massas dos componentes do cartucho, estimados para 10.000 unidades

COMPONENTE	MASSA (kg)
GAC	899,91
Solvente (Condensado)	99,16
Alumínio	384,10
Polietileno	17,90

Fonte: Autor

A determinação do IR, utilizando o protótipo experimental, permitiu comprovar que o cartucho novo utilizado em SF de EPR, que possui GAC em sua composição para a retenção de VOC, como o tolueno, pode ser regenerado após a sua dessorção completa e também , todos os seus componentes, como GAC, condensados de tolueno e água retidos, corpo de alumínio e disco de polietileno, poderão ser reciclados e transformados em matéria prima secundária para serem utilizados em novos processos industriais, contribuindo com a sustentabilidade.

Referências

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS – ACGIH .**BEI's and TLV's** Disponível em <https://www.acgih.org/news/2017/03/09/2017>. Acesso em 10.nov.2018.

ALGRANTI, E.; BUSCHINELLI, J. T. P.; De CAPITANI, E.M. **Câncer de pulmão ocupacional.** Jornal Brasileiro de Pneumologia. São Paulo.2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. NBR 13.696: **Equipamentos de Proteção Respiratória-Filtros Químicos e Combinados.** Rio de Janeiro.2005.

BENKHEDDA ET AL., 2000

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Normas Regulamentadoras-NRs da Portaria Ministerial nº 3.214.** Ministério do Trabalho e Emprego. Brasília. 1978.

BRINQUES, G.B. **Adsorção de Tolueno de Solução Aquosa em Leito de Carvão Ativado em Planta Piloto**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Departamento de Engenharia Química. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Dissertação de Mestrado Porto Alegre. 2005.

BRUM, S.S.; BIANCHI, M.L.; SILVA, V.L.; GONÇALVES, M.; GUERREIRO, M. C.; OLIVEIRA, C.A**. Preparação e Caracterização de Carvão Ativado Produzido a partir de Resíduos do Beneficiamento do Café**. Química Nova. Vol. 31. Nº. 5, p.1048-1052, 2008.

DEVORE, J. L. **Probabilidade e estatística para engenharia e ciências**. Cengage Learning. São Paulo. 692p. 2011.

FUNDAÇÃO JORGE DUPRAT DE FIGUEIREDO- FUNDACENTRO. **Programa de Proteção Respiratória: recomendações, seleção e uso de respiradores**.4.ed. FUNDACENTRO. São Paulo. 209p. 2016.

INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY (IUPAC). **Microporous and Megaporous Classification**. Disponível em <https://iupac.org/>. Acesso em 19.maio.2018.

KLAASSEN, C.D.; WATKINS III, J.B. **Fundamentos em Toxicologia de Casarett e Doull**. 2ª ed. Revisão técnica de Fávia Thiesen. MacGraw-Hill.AMGH Editora. Rio de Janeiro.2012.

LEGNER, C. **Adsorção por Carvão Ativado**. Revista Meio Filtrante. Edição 88. São Paulo.2017.

LILO-RÓDENAS, M. A.; FLETCHER, A. J.; THOMAS, K. M.; CAZORLA-AMORÓS, D.; LINARES-SOLANO, A. **Competitive adsorption of benzene-toluene mixture on actvated carbons at low concentration**. Carbon 44. Vol 1 p. 455-1463, Janeiro .2006.

RIOS, S. H. **A Higiene Ocupacional, Essa Grande Desconhecida: Vamos conhecê-la?**. Revista ABHO. São Paulo. 2016.

SAAD, S.F.I; FANTAZZINI, M.L. **Metodologia de Avaliação Ambiental**. Fundacentro Uniformiza Procedimento em Higiene. FUNDACENTRO. Atualidades em Prevenção de Acidentes. Vol. 18, nº 215. 1994.

TORLONI, M; VIEIRA, A. **Manual de Proteção Respiratória**. Ed. ABHO. São Paulo. 500p. 2003.

YING, C. P. **Bioregeneration of Granular Activated Carbon Loaded with Phenol and p-Nitrophenol:Effects of Physicochemical and Biological Factors.** Thesis submetted infulfilment of the requeriments for the degree of Doctor of Philosophy. Universiti Sains Malaysia. Malaysia.156p. 2015.