

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA  
UNIDADE DE PÓS-GRADUAÇÃO, EXTENSÃO E PESQUISA  
MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO E TECNOLOGIA  
EM SISTEMAS PRODUTIVOS

CLEBER CORRÊA VIEIRA

ESTUDO DA REGENERAÇÃO DE CARVÃO ATIVADO SATURADO DE FILTRO  
QUÍMICO USADO EM RESPIRADOR SEMIFACIAL

São Paulo  
Março/2019

CLEBER CORRÊA VIEIRA

ESTUDO DA REGENERAÇÃO DE CARVÃO ATIVADO SATURADO DE FILTRO  
QUÍMICO USADO EM RESPIRADOR SEMIFACIAL

Dissertação apresentada como exigência parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos do Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, no Programa de Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos, sob a orientação da Profa. Dra. Silvia Pierre Irazusta e coorientação do Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi.

São Paulo

Março/2019

FICHA ELABORADA PELA BIBLIOTECA NELSON ALVES VIANA  
FATEC-SP / CPS – CRB8-8281

Vieira, Cleber Corrêa

V658e      Estudo da regeneração de carvão ativado saturado de filtro químico usado em respirador semifacial / Cleber Corrêa Vieira. – São Paulo : CPS, 2019.

110 f. : il.

Orientadora: Profa. Dra. Silvia Pierre Irazusta

Coorientador: Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi

Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos) - Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, 2019.

1. Desenvolvimento tecnológico - sistemas produtivos. 2. GAC. 3. Filtro químico de respirador. 4. Adsorção. 5. Regeneração de carvão. 6. VOC. I. Irazusta, Silvia Pierre. II. Degasperi, Francisco Tadeu. III. Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza. IV. Título.

CLEBER CORRÊA VIEIRA

ESTUDO DA REGENERAÇÃO DE CARVÃO ATIVADO SATURADO DE FILTRO  
QUÍMICO USADO EM RESPIRADOR SEMIFACIAL

---

Profa. Dra. Silvia Pierre Irazusta  
Orientadora

---

Prof. Dr. Marcelo Tsuguio Okano  
Membro

---

Prof. Dr. José Damásio de Aquino  
Membro

São Paulo, 14 de março de 2019

Dedico aos amigos da T-5 do Mestrado pelo espírito de cooperação e união e a todos os professores e funcionários do curso de pós-graduação do CEETEPS pela dedicação e compromisso com a instituição e evolução dos alunos.

## AGRADECIMENTOS

À Profª. Dra. Silvia Pierre Irazusta e ao Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi pelas orientações e revisões desse trabalho.

Aos Srs. (as): Prof. Dr. Eduardo dos Santos Tada, Profª. Dra. Elisabeth Pelosi Teixeira, Sr. João Antônio Munhoz (consultor), Prof. Me. Luciano Dantas, Prof. Me. Mauricio Torloni (*in memoriam*), Eng. Milton Elias Ferreira Junior (empresa *Air Safety*), Prof. Dr. Paulo Helio Kanayama, Eng. Raul Casanova Junior (ANIMASEG), Eng. Sergio Luiz Fulco (empresa *Air Safety*) e Prof. Me. Sergio Pamboukian, pelas orientações e incentivo a realização dos estudos e pesquisas desse trabalho.

Aos Srs. (as): Profª. Dra. Adriana Fernandez Sotelo, Profª. Patrícia Hassato, Prof. Paulo Cesar Guimarães Pereira, Prof. Me. Robson Fontes da Costa e aluna Stefany Sena Figueiredo pela colaboração no Laboratório de Saneamento da FATEC São Paulo.

Ao Eng. Carlos Heinz Hoffmann (empresa RAMSOR) e ao Sr. Eduardo da Silva (aluno da FATEC São Paulo), pela contribuição ao desenvolvimento do desenho técnico e da fabricação do dispositivo metálico do arranjo experimental.

À empresa *Air Safety*, pelo fornecimento das amostras de filtros químicos, que foram utilizadas no arranjo experimental.

“ Todo efeito tem uma causa.  
Todo efeito inteligente tem uma causa inteligente.  
O poder da causa inteligente está na razão da grandeza do efeito. ”

(A Gênese)

**Allan Kardek**

## RESUMO

VIEIRA, C. C. **Estudo da regeneração de carvão ativado saturado de filtro químico usado em respirador semifacial.** 110 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Desenvolvimento da Educação Profissional). Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2019.

Com o objetivo de se reutilizar o filtro químico de respirador semifacial (SF), utilizado para a proteção respiratória de trabalhadores expostos a vapores de compostos orgânicos (VOC), o, utilizados como solvente orgânico na fabricação de tintas e vernizes, foi desenvolvido um arranjo experimental na bancada, onde o filtro químico de um fabricante nacional foi submetido a um ciclo de ensaios de regeneração: adsorção com VOC, neste caso representado pelo tolueno, dessorção com vapor d'água e posterior secagem em estufa. Utilizando-se de 05 filtros químicos novos do mesmo lote deste fabricante, todos submetidos ao ciclo de ensaios de regeneração por quatro vezes, determinou-se as massas de VOCs adsorvidas em cada ciclo. Foi calculado o índice de regeneração (IR) e o coeficiente adsortivo (Ca) do carvão ativado granulado (GAC) contido nestes filtros químicos aqui denominados de preparados (FQPs), sejam novos ou regenerados, com o objetivo de validar a regeneração dos mesmos. Os resultados obtidos, revelaram que os filtros químicos regenerados submetidos ao método proposto neste trabalho, atingiram o valor de IR próximo a 100% e o do Ca semelhante ao filtro químico novo, na média  $Ca_m = 110,2 \pm 0,1 \text{ mg.g}^{-1}$ , o que nos permite concluir que os filtros químicos ensaiados poderão ser reutilizados ou seus componentes reciclados. Atualmente, os usuários de equipamentos de proteção respiratória (EPR), são os responsáveis por sua destinação final, pelo fato do filtro químico, uma vez saturado com VOC, transformar-se em resíduo classe I. Assim, o presente trabalho oferece uma alternativa de manejo sustentável dos componentes do filtro químico, que são: GAC, alumínio e polietileno, além do condensado do solvente recuperado, de vez que a sua descontaminação ativa, permite não só o reuso, mas também possibilita a logística reversa de acordo com as diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), atendendo aos preceitos da economia circular (EC) neste processo produtivo.

**Palavras-chave:** GAC, Filtro Químico de Respirador, Regeneração de Carvão, VOC.

## ABSTRACT

VIEIRA, C. C. **STUDY OF THE GRANULAR ACTIVATED CARBON REGENERATION OF SATURATED HALF MASK'S CARTRIDGES RESPIRATORS.** 110 f. Dissertação Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos. Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2019.

In order to reuse the half mask respirator cartridge, used for the respiratory protection of workers exposed to vapors organic compounds (VOC) used as an organic solvent in the manufacture of paints and varnishes, an experimental prototype developed with the cartridge of a Brazilian manufacturer was submitted to a regeneration process: adsorption with VOC of toluene, desorption with water vapor and oven drying of the Laboratory. Using 5 new cartridges of the same sample, all submitted in the regeneration cycle by 04 times. A new equation was developed to obtain the regeneration index (IR) and the adsorption capacity (Ca) of the granulated activated carbon (GAC) contained in these cartridges. The results showed that the regenerated cartridges submitted to the method proposed in this work reached a IR closed to 100% and VOC adsorption capacity is similar to the new cartridge, on average value  $Ca_m = 110,2 \pm 0,1 \text{ mg.g}^{-1}$ , which we can conclude that the cartridge may be reused or recycled. ). Today, the users of Respiratory Protective Equipment are responsible for their final destination, because cartridges once saturated with VOC, becomes class I waste. Thus, the present paper offers an alternative of sustainable management of the cartridge's components, which are GAC, aluminum and polyethylene. In addition to the condensate of recovered solvent, since its active decontamination not only allows reuse, but also allows the reverse logistics according to the guidelines of the National Solid Waste Policy, with circular economy concept at this productive process.

**Keywords:** GAC, Respirator Cartridge, Carbon Regeneration, VOC.

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1:	Fator de Proteção Atribuído (FPA).....	32
Quadro 2:	Memorial de cálculo do Índice de Regeneração (IR).....	106
Quadro 3:	Memorial de cálculo do coeficiente adsortivo (Ca) .....	107

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Classificação dos Poros (IUPAC) .....	37
Tabela 2:	Valores obtidos de $M_{fpq}$ , $M_{SAT}$ e $M_{VOC}$ dos filtros químicos.....	74
Tabela 3:	Concentração de tolueno ( $C_{tolueno}$ ) .....	76
Tabela 4:	Valores de massa do filtro químico preparado ( $M_{fpq}$ ) .....	77
Tabela 5:	Resultado do cálculo do Índice de Regeneração (IR) .....	78
Tabela 6:	$M_{gac}$ e os quatro valores de $M_{VOC}$ obtidos nos ensaios de regeneração.....	81
Tabela 7:	Resultados do cálculo do Coeficiente Adsorativo ( $Ca$ ) .....	81
Tabela 8:	Comparação entre o método desenvolvido para a regeneração de GAC desenvolvido no arranjo experimental e o da literatura .....	83

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Sistema de ventilação local exaustora (VLE) .....	18
Figura 2:	Cabine de pintura industrial .....	19
Figura 3:	Respirador tipo peça semifacial (SF) .....	19
Figura 4:	Vias respiratórias .....	28
Figura 5:	Grupos funcionais encontrados na superfície do GAC.....	37
Figura 6:	Etapas da cinética de adsorção .....	39
Figura 7:	Conceito da Economia Circular (EC) .....	44
Figura 8:	Fluxograma para a classificação do resíduo sólido .....	46
Figura 9:	Peça SF modelo <i>Air Tox II</i> , com filtro químico encaixado, constituindo o EPR.....	50
Figura 10:	Filtro químico novo em sua embalagem original .....	50
Figura 11:	Uso do solvente orgânico tolueno .....	51
Figura 12:	Componentes do filtro químico .....	52
Figura 13:	Pesagem do corpo e tampas de alumínio do filtro químico (A) e do GAC (B) .....	52
Figura 14:	Layout do arranjo experimental .....	54
Figura 15:	Arranjo experimental preparado para os ensaios de adsorção e dessorção.....	57
Figura 16:	Fluxograma dos quatro ciclos de ensaios de regeneração .....	59
Figura 17:	Pesagem do GAC ( $M_{gac(2)}$ ), retirado do filtro químico nº 2.....	61
Figura 18:	Filtro químico sendo inserido no dispositivo metálico (Câmara 2) .....	62
Figura 19:	Dispositivo metálico (Câmara 2) instalado dentro da caixa de isopor.....	63
Figura 20:	Uso de aquecedores para as Câmaras 1 e 2.....	63
Figura 21:	Observação de gotículas de tolueno refletidas no tubo do coletor DRECHSEL (A) e cuba de gelo (B) .....	64
Figura 22:	Pesagem do filtro químico (A) após o uso do dessecador (B) .....	65
Figura 23:	Formação de gotículas de condensados durante o ensaio de dessorção.....	66
Figura 24:	Ensaio de secagem do filtro químico, na estufa elétrica .....	67
Figura 25:	Pesagem do filtro químico, após o ensaio de secagem .....	68
Figura 26:	Massa de VOC (MVOC) retida nos filtros químicos ensaiados .....	75
Figura 27:	Média da massa de VOC (Mvoc) adsorvida .....	75

Figura 28:	Índice de Regeneração (IR), conforme comparação entre os ciclos de ensaios realizados.....	79
Figura 29:	Coeficiente adsortivo (Ca) para cada ensaio de adsorção (de 1 a 4) .....	82

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1:	Fator de Proteção Requerido (FPR) .....	30
Equação 2:	Massa de VOC ( $M_{VOC}$ ) adsorvida pelo filtro químico .....	73
Equação 3	Índice de Regeneração (IR) .....	78
Equação 4:	Coefficiente Adsorativo ( $C_a$ ) .....	80

## LISTA DE SIGLAS

ABHO	Associação Brasileira de Higienistas Ocupacionais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACS	<i>American Chemical Society</i> (Sociedade Americana de Químicos)
ANIMASEG	Associação Nacional da Indústria de Material de Segurança e Proteção ao Trabalho
ACGIH	<i>American Conference of Governmental Industrial Hygienists</i> (Conferência Americana de Higienistas Industriais Governamentais)
BET	Brunauer, Emmett e Teller
BTX	Benzeno, Tolueno e Xileno
CA	Certificado de Aprovação
Ca	Coefficiente adsortivo
Ca <sub>m</sub>	Coefficiente adsortivo médio
CADRI	Certificado de Movimentação de Resíduos de Interesse Ambiental
CAS	<i>Chemical Abstract Series</i> (Série Química Abstrata)
CCC	<i>Calgon Carbon Corporation</i> (Indústria de Carbono Calgon)
CDC	<i>Centers of Disease Control and Prevention</i> (Centro de Controle e Prevenção de Doenças)
CETESB	Cia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo
CG-MS	Cromatografia gasosa com detector de massa acoplado
DO	Doença Ocupacional
EC	Economia Circular (Circular Economy)
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i> (Agência de Proteção Ambiental)
EPC	Equipamento de Proteção Coletiva
EPI	Equipamento de Proteção Individual
EPR	Equipamento de Proteção Respiratória
F	Peça facial inteira
FATEC	Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo
FISP	Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico
FPA	Fator de Proteção Atribuído
FPR	Fator de Proteção Requerido

FQP	Filtro Químico Preparado
FUNDACENTRO	Fundação Jorge Duprat Figueiredo de Segurança e Medicina do Trabalho
GAC	<i>Granular Activated Carbon</i> (Carvão ativado granulado)
GEE	Gases de Efeito Estufa
GRS	Gerenciamento de Resíduos Sólidos
HO	Higiene Ocupacional
IPVS	Imediatamente Perigoso a Vida e à Saúde ( <i>Immediate Dangerous for Health and Life (IDHL)</i> )
IARC	Agência Internacional de Pesquisa em Câncer
ILO	<i>International Labour Organization</i> (Organização Internacional do Trabalho (OIT))
IN 01	Instrução Normativa nº 01
IR	Índice de Regeneração
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional de Normalização)
IUPAC	<i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i> (União Internacional de Química Pura e Aplicada)
LIE	Limite Inferior de Explosividade
LSE	Limite Superior de Explosividade
LT	Limite de Tolerância
LTV	Laboratório de Tecnologia do Vácuo
MA	Máscara Autônoma
ME	Ministério da Economia
M <sub>voc</sub>	Massa de composto orgânico volátil
MESH	Peneira (abertura por polegada linear)
NBR	Norma Brasileira
NHO	Norma de Higiene Ocupacional
NIMBY	<i>Not in my back yard</i> (Não em meu quintal)
NR	Normas Regulamentadoras
OIT	Organização Internacional do Trabalho
OMS	Organização Mundial da Saúde
PA	Para Análise
P1	Filtro de ação mecânica para reter poeiras e/ou névoas

P2	Filtro de ação mecânica para reter poeiras, névoas, fumos e/ou agentes biológicos
PCMSO	Programa de Controle Médico e Saúde Ocupacional
PPF	Peça Semifacial Filtrante
PPF2	Peça Semifacial Filtrante, com filtro de ação mecânica para reter poeiras, névoas, fumos e/ou agentes biológicos
PIB	Produto Interno Bruto
PPR	Programa de Proteção Respiratória
PPRA	Programa de Prevenção a Riscos Ambientais
PQs	Produtos Químicos
RMS	<i>Root Mean Square</i> (Valor Eficaz)
SBPR	Sistema Brasileiro de Proteção Respiratória
SEPT	Secretaria Especial de Previdência e Trabalho
SESMT	Serviço Especializado em Segurança e Medicina do Trabalho
SF	Semifacial
SNC	Sistema Nervoso Central
SP	São Paulo
SSO	Segurança e Saúde Ocupacional
SSMA	Segurança, Saúde e Meio Ambiente
SST	Segurança e Saúde no Trabalho
VGD	Ventilação Geral Diluidora
VLE	Ventilação Local Exaustora
VO	Vapor Orgânico
VOC	<i>Volatile Organic Compound</i> (Composto Orgânico Volátil)
WHO	<i>World Health Organization</i> (Organização Mundial da Saúde (OMS))

## LISTA DE DEFINIÇÕES

**Breakthrough time (tempo de saturação):** é o intervalo de tempo entre o início do ensaio de adsorção, quando o filtro químico é admitido como preparado (FQP), ou seja, isento de compostos orgânicos voláteis (VOCs) e umidade e após a sua saturação, quando ocorreu o desprendimento dos VOCs do filtro químico submetido ao ensaio de adsorção. Esta constatação é qualitativa e feita por inspeção visual do aparecimento de gotículas de condensados no coletor tipo Dreschel do arranjo experimental. Este intervalo de tempo é medido em minutos [min].

**Coefficiente Adsorativo (Ca):** utilizado para medir a capacidade de adsorção de compostos orgânicos voláteis (VOCs) dos filtros químicos preparados (FQPs), após serem submetidos ao ensaio de adsorção no arranjo experimental. É calculado pela diferença entre  $M_{VOC}$  e  $M_{GAC}$ . Sua unidade é medida em miligrama por grama [ $mg.g^{-1}$ ].

**Ciclo de ensaios de regeneração:** constituído pelo ensaio de adsorção, dessorção e secagem onde o filtro químico é inicialmente saturado com VOC (tolueno) e posterior dessorção com vapor d'água, no arranjo experimental e após estas duas fases, é colocado em estufa para a secagem. Neste trabalho utilizaremos cinco filtros químicos novos que serão submetidos a quatro ciclos de ensaios de regeneração, para a obtenção das  $M_{voc}$  e  $M_{fqp}$ , para o cálculo do IR e do Ca.

**Filtro químico:** composto por carvão ativado granulado (GAC) importado, que retém os VOCs pelo processo de fisissorção. O filtro químico é componente do equipamento de proteção respiratória (EPR) tipo semifacial (SF). No arranjo experimental e estufa, serão ensaiados cinco filtros químicos novos, do mesmo lote e fabricante nacional.

**Filtro químico novo:** filtro químico de EPR tipo SF em sua embalagem original. Fornecido por fabricante de EPR nacional, de mesmo lote e com certificado de aprovação (CA), que será submetido aos quatro ciclos de regeneração proposto neste trabalho.

**Filtro Químico Preparado (FQP):** é denominado como o filtro químico novo, em sua embalagem original do fabricante de EPRs e também admitido como filtro químico regenerado, após cada ensaio de regeneração, que serão realizados no arranjo experimental e estufa.

**Índice de Regeneração (IR):** admitido para medir a eficiência da regeneração do filtro químico que será submetido aos ciclos de ensaios de regeneração proposto neste trabalho. É calculado pela comparação entre a massa do filtro químico preparado ( $M_{fqp}$ ) quando novo e após submetido ao ciclo de ensaio de regeneração seguinte. O IR é um valor percentual [%]. Admite-se que quanto menor for a diferença de massa dos FQPs ( $M_{fqp}$ ), esse índice se aproximará a 100%, o que indicará que os GACs do filtro químico estarão com o mínimo de rejeitos de VOCs e umidade e, portanto, ativados e preparados novamente para ser reutilizados pelo usuário do respirador tipo SF.

**Nível de ação (NA):** considera-se nível de ação o valor acima do qual devem ser iniciadas ações preventivas de forma a minimizar a probabilidade de que as exposições a agentes ambientais ultrapassem os limites de exposição. O valor do NA corresponde a 50% do limite de tolerância (LT) (BRASIL, 2018c).

**M<sub>fqp</sub>**: massa de filtro químico preparado. A ser medida na balança analítica quando o filtro químico está novo, ou seja, na sua embalagem original do fabricante e após o filtro químico ter sido submetido ao ciclo de ensaios de regeneração, ou seja, quando se admitiu que o filtro químico ficou regenerado e novamente pronto para o uso. Sua unidade é grama [g].

**M<sub>gac</sub>**: massa de carvão ativado (M<sub>gac</sub>). Foi obtida após cada filtro químico ter sido submetido ao quarto ciclo de ensaios de regeneração e com a ação mecânica do uso de serra fita manual, retirou-se todo o GAC do corpo de cada filtro químico, que foi colocado dentro de um recipiente para a sua pesagem em balança analítica. Sua unidade é grama [g].

**M<sub>SAT</sub>**: massa do filtro químico saturado por VOCs, a ser obtida após o ensaio de adsorção no arranjo experimental. Sua unidade é grama [g].

**M<sub>voc</sub>**: massa de vapor orgânico volátil. No presente ensaio, será utilizado solvente orgânico tolueno para ser adsorvido pelos GACs do filtro químico, quando submetido ao ensaio de adsorção no arranjo experimental. É calculado pela diferença entre M<sub>SAT</sub> e M<sub>FQP</sub>. Sua unidade é grama [g].

**Saturação**: resultado do processo de adsorção, no qual os GACs do filtro químico não conseguem mais reter os VOCs. Neste instante é admitido a máxima capacidade adsortiva (Ca) pois as moléculas de VOCs começarão a se desprender do filtro químico em teste, demonstrando que os seus GACs ficaram saturados.

## LISTA DE SÍMBOLOS

Å	Ångström
atm	atmosfera
°C	graus Celsius
$C_{\text{tolueno}}$	concentração de tolueno
CV	coeficiente de variação
DP	desvio padrão
g	grama
$\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$	grama por mol
Hz	Hertz
$\text{kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$	quilograma força por centímetro quadrado
Pa	Pascal
ppm	partes por milhão
$\eta\text{m}$	nano metro
m	metro
mesh	unidade de abertura de malha
mg	micrograma
mm	milímetro
mmHg	milímetro de mercúrio
$\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$	metro quadrado por grama
$\bar{X}$	média aritmética
$\mu\text{m}$	micron
$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	miligrama por litro
$\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	miligrama por grama
mL	mililitro
pH	potencial hidrogeniônico
%	percentagem
$S_{\text{BET}}$	área superficial (curva BET)
t	tonelada
torr	Torriceli

vol.	volume
W	Watts

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	17
<b>1.1 QUESTÃO DE PESQUISA</b> .....	23
<b>1.2 OBJETIVOS</b> .....	23
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	25
<b>2.1 Solventes orgânicos e exposição ocupacional</b> .....	25
<b>2.2 Compostos químicos e toxicologia ocupacional</b> .....	27
<b>2.3 Uso de filtros químicos</b> .....	30
<b>2.4 Avaliação de risco</b> .....	33
<b>2.5 Carvão ativado granulado (GAC)</b> .....	34
<b>2.6 Mecanismo de adsorção do GAC</b> .....	38
<i>2.6.1 Estudos de adsorção de GAC</i> .....	40
<b>2.7 Estudos de regeneração de GAC</b> .....	41
<i>2.7.1 Destinação dos EPRs como resíduos sólidos</i> .....	42
<b>2.8 Aspectos Ambientais</b> .....	45
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	49
<b>3.1 Local de realização do trabalho</b> .....	49
<b>3.2 MATERIAIS</b> .....	49
<i>3.2.1 Amostras</i> .....	49
<i>3.2.2 Arranjo experimental</i> .....	53
<b>3.3 PROCEDIMENTO</b> .....	57
<i>3.3.1 Ensaio de Adsorção</i> .....	63
<i>3.3.2 Processo de dessorção</i> .....	65
<i>3.3.3 Secagem do filtro químico</i> .....	67
<i>3.3.4 Análise por CG-MS</i> .....	68
<i>3.3.5 Teste “t” Student</i> .....	69
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	71
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	85
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	87
<b>APÊNDICES</b> .....	96
<b>APÊNDICE A- Cálculo da concentração de VOC utilizado nos ensaios de adsorção</b> ....	96

<b>APÊNDICE B- Relatório de ensaio de vedação da Câmara 2 .....</b>	<b>98</b>
<b>APÊNDICE C- Isotermas de adsorção .....</b>	<b>101</b>
<b>APÊNDICE D- Cromatografia gasosa com detector de massa acoplado (GC-MS).....</b>	<b>105</b>
<b>APÊNDICE E- Memorial de Cálculo do Índice de Regeneração (IR).....</b>	<b>106</b>
<b>APÊNDICE F- Memorial de Cálculo do Coeficiente Adsorativo (Ca) .....</b>	<b>107</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>108</b>
<b>ANEXO A .....</b>	<b>108</b>
<b>A1-Relatório de Análise de Amostras PA e de condensados.....</b>	<b>108</b>
<b>A2-Relatório de Análise de Amostras PA e de condensados.....</b>	<b>109</b>
<b>A3-Relatório de Análise de Amostras PA e de condensados.....</b>	<b>110</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo a Agência Norte Americana para a Proteção Ambiental (do inglês: *Environmental Protection Agency* (EPA)), os compostos orgânicos voláteis (do inglês: *Volatile Organic Compounds* (VOCs)) são substâncias que dependendo da sua concentração, são tóxicas ao ser humano e ao meio ambiente e devem ser monitoradas na atmosfera, no solo ou em meio aquoso (EPA, 2018).

Os VOCs estão presentes em uma variedade de produtos químicos, os quais apresentam efeitos danosos à saúde, especialmente tratando-se do trabalhador, em exposição por curtos ou prolongados períodos de tempo, ou seja, por exposição aguda ou crônica (ACGIH, 2018). A concentração de contaminantes é avaliada e comparada aos limites de tolerância (LT) do produto químico. Uma das fontes de referência para esses valores, é a publicação bianual da *American Conference of Governmental Industrial Hygienists* (ACGIH), traduzido pela Associação Brasileira de Higienistas Ocupacionais (ABHO), cujos LTs, em alguns casos, são aceitos pelas Normas Regulamentadoras (NRs) da legislação trabalhista (BRASIL, 1978) e utilizados para o controle do ar do ambiente de trabalho.

O reconhecimento do nexos entre a doença ocupacional e a exposição a agentes químicos tóxicos no ambiente de trabalho foi relatado pelo médico italiano Bernardo Ramazzini, considerado “Pai da Medicina do Trabalho” pelo seu trabalho intitulado “As doenças dos Trabalhadores” (do latim: *De Morbis Artificum Diatriba*), onde descreveu detalhadamente as respostas dos pacientes nas oitavas realizadas, referente as queixas de dores ou sintomas de doenças, que estariam relacionadas a exposições aos riscos ambientais, tais como: agentes químicos, físicos e ergonômicos, contraídas na atividade laboral realizada pelos mesmos. Neste livro, Ramazzini informou sobre a doença dos pintores, descrito como sendo os artistas que manipulavam tintas e vernizes a base de corantes misturados aos solventes orgânicos, tais como: azeite de nozes e de linho. Estes compostos orgânicos são voláteis e pelo fato desses pintores trabalharem em ambientes fechados, propiciam altas concentrações de VOCs, além do que aqueles pintores utilizavam aventais e blusas manchadas de tinta, aumentando ainda mais a concentração dos VOCs no ambiente de trabalho. Uma vez inalado pelos pintores, os produtos químicos no estado de vapor, passam pelas vias respiratórias, atingindo os pulmões e muitas vezes também os alvéolos, alcançando a circulação sanguínea, e assim transportados a outros órgãos, com o efeito sistêmico e cumulativo, com efeitos tóxicos

a nível do sistema nervoso central (SNC). Os sintomas relatados pelos pintores foram: dores de cabeça, náuseas e perda olfativa (RAMAZZINI, 2016).

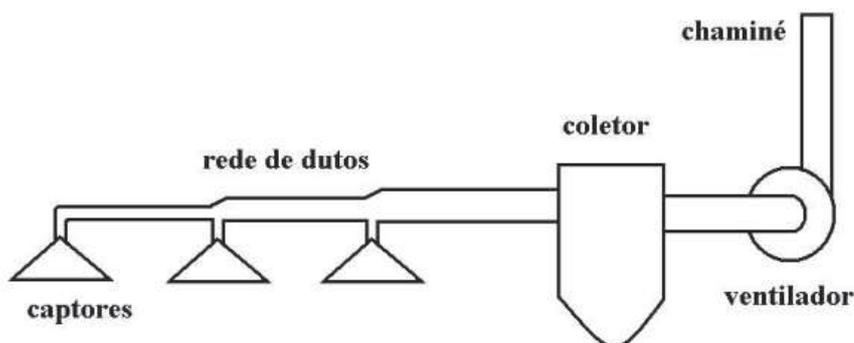
Pela legislação trabalhista (BRASIL, 1978) há a exigência das empresas privadas ou autarquias públicas sob o regime da Consolidação das Leis Trabalhistas (CLT), de elaborarem o Programa de Prevenção de Riscos Ambientais (PPRA) e neste programa necessariamente, há de se conhecer previamente as características químicas, físicas e de toxicidade desses produtos químicos (PQs), além da porcentagem do gás oxigênio presente no ambiente de trabalho e necessariamente se realizar a avaliação quantitativa das concentrações dos PQs no estado gasoso, mediante procedimentos técnicos para então se definir os meios de proteção aos trabalhadores expostos.

O Programa de Proteção Respiratória (PPR) publicado pela Fundação Jorge Duprat Figueiredo (FUNDACENTRO) orienta sobre a escolha da proteção respiratória que o pintor industrial deverá utilizar de acordo com o risco de exposição (FUNDACENTRO, 2016).

Para melhorar o ambiente de trabalho há a necessidade de substituição de produtos químicos tóxicos como tintas e vernizes com solventes orgânicos por solventes a base de água, desde que tecnicamente viável e definida pela gerência da produção, com anuência da área de Segurança, Saúde e Meio Ambiente (LIED, 2011).

Também são importantes para a redução da concentração de PQs no ambiente de trabalho, a adoção de equipamento de proteção coletiva (EPC) como sistemas de ventilação geral diluidora (VGD), sistemas de ventilação local exaustora (VLE) conforme ilustra a Figura 1 (OLIVEIRA, 2018) e uso de cabines de pintura com cortina d'água (Figura 2).

Figura 1: Sistema de ventilação local exaustora (VLE)



Fonte: OLIVEIRA (2018)

Figura 2: Cabine de pintura industrial



Fonte: CONSULTECH GROUP (2018)

Enquanto as medidas de substituição de PQs por menos tóxicos e adoção de EPCs estiverem em curso, há a obrigatoriedade das empresas em fornecerem gratuitamente aos pintores expostos a VOCs, os equipamentos de proteção individual (EPIs) de acordo com a NR 6: EPI (BRASIL, 2018a), dentre eles, o equipamento de proteção respiratória (EPR) a ser definido tecnicamente pelo administrador do PPR, sendo que um exemplo de EPR é o tipo peça semifacial (SF) com filtro químico para retenção de VOCs ilustrado na Figura 3, a qual, foi utilizado neste trabalho.

Figura 3: Respirador tipo peça semifacial (SF)



Fonte: SBPR (2018)

A atual Secretaria Especial de Previdência e Trabalho (SEPT), criada pela medida provisória nº 870 de 01/01/2019 e pelo Decreto Lei nº 9.679 de 02/01/2019 do Ministério da Economia (ME), em 1994, na ocasião Ministério do Trabalho e Emprego, através da Instrução Normativa nº 01 introduziu o PPR (FUNDACENTRO, 2016).

O PPR define os procedimentos para a proteção respiratória do trabalhador e há de se cumprir o cronograma estabelecido no PPR: administração do programa, treinamento, avaliação médica, ensaios de vedação, monitoramento das exposições ocupacionais, seleção e distribuição do respirador, monitoramento do uso, manutenção, inspeção, limpeza e higienização dos respiradores, fontes e qualidade de ar respirável, guarda dos respiradores, procedimentos para emergência, problemas especiais e ações e cronograma (FUNDACENTRO, 2016).

O filtro de respirador SF utilizado no arranjo experimental é classificado pela norma NBR 12.543 (ABNT, 2017), como filtro químico para reter vapores orgânicos (VO) utilizado em respiradores SF purificador de equipamento dependente da atmosfera ambiente e de pressão negativa. O usuário deste EPR, por pressão pulmonar, direciona o ar próximo das suas vias respiratórias para o filtro químico que contém carvão ativado granulado (do inglês: *Granular Activated Carbon* (GAC)) e pelo processo físico de adsorção ou fisissorção, retém as moléculas de VOCs (BREVIGLIERO et al., 2006).

Para a escolha técnica do EPR, utilizam-se os parâmetros do PPR (FUNDACENTRO, 2016) e para tanto, deve-se estabelecer a comparação entre o fator de proteção atribuído (FPA) e o fator de proteção requerido (FPR). O FPR é resultado da avaliação ambiental do contaminante tóxico e o FPA é um valor numérico atribuído ao EPR. O resultado numérico do FPR deve ser necessariamente menor que o FPA, além disso, o administrador do PPR deve observar outros fatores limitantes, tais como: concentração mínima do gás oxigênio na atmosfera local de trabalho, limiar de odor do contaminante, irritações na pele e olhos do usuário exposto, etc, e assim poderão utilizar outros equipamentos de proteção individual (EPIs) em conjunto com o respirador (TORLONI; VIEIRA, 2003).

Além do aspecto técnico, a vedação entre o elastômero do corpo do respirador e a face do rosto do usuário, para isolar as vias respiratórias do mesmo, é um item importante para a escolha do EPR. A melhor vedação entre o EPR e o rosto dos usuários é atribuída aos modelos de pressão positiva, que funcionam com aspiração de ar ambiente ou de linha de ar comprimido. Este fluxo de ar após a devida filtração, entra na região respiratória do usuário, cria uma pressão superior a pressão atmosférica na região respiratória e funciona como um importante meio de

vedação, aumentando a barreira física contra a penetração de contaminantes tóxicos ou asfixia (quando na presença de atmosfera com teor de oxigênio inferior a 18 % em vol., conforme descrito no anexo nº 11 da NR 15 (BRASIL, 2018c). O FPA é um valor atribuído ao respirador e varia na escala de 5 a 10.000 (FUNDACENTRO, 2016). Com relação ao respirador tipo peça SF com filtro químico e mecânico que o pintor industrial utilizará para a sua proteção respiratória, a limitação de uso é referente a concentração de VOCs que poderá ser de até dez vezes o seu LT e este valor deverá ser inferior ao valor da concentração imediatamente perigosa à vida ou à Saúde (IPVS), que representa um valor limite perigoso, pois a partir desta concentração, a inalação de VOCs ou deficiência de oxigênio, poderá levar o trabalhador exposto a um quadro de incapacitação ou até óbito. Portanto, o administrador do PPR deverá analisar todos os parâmetros técnicos, previstos no PPR para decidir sobre a escolha do modelo de respirador adequado e demais EPIs a serem oferecidos ao trabalhador exposto e inserir estes dados no Programa de Prevenção aos Riscos Ambientais (PPRA), conforme NR 9 (BRASIL, 2018b).

Nos ambientes fechados e com pouca ventilação, a concentração de VOC encontra-se facilmente acima dos valores do LT preconizado na legislação, expondo o trabalhador a doenças ocupacionais (ALGRANTI et al., 2010). No ambiente de trabalho, os VOC são emanados por uma variedade de produtos químicos, que são utilizados como matérias primas de outros produtos, como tintas, removedores, solventes e graxas.

O verniz, por exemplo, é utilizado para melhorar o acabamento em madeiras e metais dando proteção e características de profundidade e brilho. Possui em sua formulação óleo secante, resinas e solventes orgânicos, entre estes últimos estão o xileno e tolueno, e modernamente são utilizados também derivados de petróleo como poliuretano ou epóxi. Em especial o composto tolueno, presente nos diluidores de vernizes e tintas pode causar sintomas como letargia, tontura e confusão, mesmo após curtos períodos de exposição (OLSON, 2014).

O tolueno possui valor de concentração do limiar de odor em 0,16 ppm, que é o valor de concentração mínima, a qual o ser humano tem a percepção pelo olfato, de identificar a presença de VOCs. O valor do seu LT é de 78 ppm ou 290 mg.m<sup>-3</sup> (BRASIL, 2018c e ACGIH, 2018) e o valor de concentração IPVS é de 500 ppm (CDC, 2018). Para uma concentração próxima ao valor de 188 mg.m<sup>-3</sup>, mesmo sendo inferior ao valor de LT do tolueno, o trabalhador exposto sem o uso do EPR, ao inalar esse contaminante poderá apresentar sintomas como: letargia, tontura e confusão, mesmo após períodos curtos de exposição (McKEE et al., 2018).

Como medida preventiva de antecipação aos riscos de intoxicação, a substituição do filtro químico do respirador tipo SF deverá ocorrer sempre antes que o pintor, usuário do EPR, possa vir a sentir os odores provenientes da passagem de VOCs pelos GACs do filtro químico que se tornou saturado, e, portanto, deixou de filtrar o contaminante. Segundo o PPR (FUNDACENTRO, 2016) o administrador deste programa deverá estabelecer o prazo máximo para a reposição do filtro saturado por um novo. Este procedimento deve ocorrer em local sem presença de contaminantes tóxicos e o filtro saturado deverá ser descartado em um compartimento específico, em local apropriado. O compartimento intermediário destinado a acondicionar estes filtros químicos saturados, poderá ser um tambor metálico lacrado a prova de explosão, pois evita o acúmulo de vapores e deverá estar em local sinalizado e apropriado para este fim. A norma NBR 10.004 (ABNT, 2004) classifica o filtro usado como resíduo sólido de classe I, ou seja, trata-se de um filtro químico que contém resíduo tóxico, no caso, o solvente orgânico adsorvido no GAC e assim, as empresas consumidoras desses filtros químicos deverão providenciar o seu posterior descarte em Aterro Sanitário, classe I ou incinerador (BARBOSA; IBRAHIN, 2014).

Segundo Jardim et al. (2012), para a destinação final de resíduos sólidos contaminados, como por exemplo, os filtros químicos saturados de EPRs, a empresa consumidora de EPRs deverá emitir o Certificado de Movimentação de Resíduo de Interesse Ambiental (CADRI), que é conhecido como certificado de aprovação e destinação de resíduos industriais. No estado de São Paulo, este documento é emitido pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB). O CADRI é obrigatório para todo tipo de resíduo de interesse ambiental (BARBOSA; IBRAHIN, 2014). Para se obter o CADRI a empresa deve providenciar o laudo de caracterização de resíduos, que envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem, além de seus constituintes e características com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido.

De fato, segundo o Eng. Sergio Fulco, gerente da empresa *Air Safety* (SBPR, 2018), que é fabricante nacional de EPRs tipo SF, são utilizados GACs importados da empresa *Calgon Carbon Corporation* (CCC), na fabricação dos filtros químicos VO, do modelo *Air Tox II* de EPR. Uma vez saturados no processo de adsorção de VOCs, se tornam contaminados e assim, os consumidores desses produtos são obrigados pela legislação ambiental, a descartá-los em local adequado (BARBOSA; IBRAHIN, 2014).

Dentro deste contexto, este trabalho tem o objetivo de comprovar a possibilidade de se descontaminar os GACs dos filtros químicos saturados por VOCs. O GAC é um produto

importado e a possibilidade de recuperá-lo abrirá oportunidades de novos negócios aos fabricantes de EPRs, uma vez que os GACs poderão vir a ser matéria prima secundária e retornar à produção de novos filtros químicos, reduzindo o volume de matéria prima virgem de GAC, reduzindo os custos de fabricação. Uma vez descontaminados, os GACs do filtro químico pela metodologia apresentada, todos os componentes do filtro químico poderão ser reciclados, no conceito de sustentabilidade e economia circular (EC) (KIRCHHERR et al. (2017).

## 1.1 QUESTÃO DE PESQUISA

O arranjo experimental proposto neste trabalho se presta à regeneração de carvão ativado granulado (GAC) de filtro químico de respirador tipo peça semifacial (SF), submetido ao ensaio de adsorção por compostos orgânicos voláteis (VOCs)?

## 1.2 OBJETIVOS

### **Geral:**

O objetivo da pesquisa é propor um método aplicado a regeneração de GAC de filtro químico utilizado em conjunto com o EPR tipo SF para adsorção de VOCs, com vistas ao manejo sustentável destes produtos, possibilitando a recuperação dos VOCs adsorvidos, bem como de todos os componentes do filtro químico testado.

### **Específicos:**

- Desenvolver um arranjo experimental e comprovar a sua aplicabilidade na regeneração de filtros químicos que contém GAC;

- Comprovar a viabilidade e aplicabilidade do método para regeneração do filtro químico ou do GAC contido no mesmo, através do cálculo e comparação dos índices de regeneração (IRs);
- Quantificar a capacidade de adsorção de VOCs pelo GAC utilizado no filtro químico submetido ao ciclo de ensaios do método proposto, através do cálculo do coeficiente adsorptivo ( $C_a$ ) e comparar com os valores de  $C_a$  obtidos na literatura.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Solventes orgânicos e exposição ocupacional

Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), os trabalhadores representam metade da população mundial e são os maiores contribuintes para o desenvolvimento econômico e social dos países. Sua saúde não é somente determinada pelos riscos presentes no ambiente de trabalho, mas também pelos fatores sociais e individuais e acesso aos serviços de saúde. Por sua vez, a disponibilidade efetiva de intervenções para a prevenção de riscos ocupacionais para proteção e promoção da saúde no ambiente do trabalho não é tão efetiva, pois há várias lacunas entre países no que se refere ao controle da saúde ocupacional de seus trabalhadores. (WHO, 2018)

A relevância do tema exposição ocupacional a agentes químicos é amplamente reconhecida. A Organização Internacional do Trabalho (OIT) estimou em 2018, que numa projeção anual, todos os dias pessoas morrem como resultado de acidentes ou doenças ocupacionais. O resultado foi mais de 2,78 milhões de óbitos anuais, incluindo-se a quantia de 374 milhões de pessoas com incapacidades por ano relacionadas ao trabalho. A falta de práticas de prevenção em segurança e saúde ocupacional (SSO) resultou em custos de 3,49 % do Produto Interno Bruto (PIB) mundial (ILO, 2018).

Compostos orgânicos voláteis (VOCs) são compostos de carbono, excluindo-se monóxido de carbono, dióxido de carbono, ácido carbônico, compostos metálicos ou carbonatos e carbonato de amônia, os quais participam de reações fotoquímicas na atmosfera, exceto aqueles considerados pela *Environmental Protection Agency* (EPA) como não sendo de reação fotoquímica. Os VOCs são compostos orgânicos voláteis que em ambientes fechados, se evaporam com baixos valores de pressão e temperatura. Esta definição é utilizada na literatura em geral e na qualidade de ar em ambientes fechados. Uma vez voláteis, os compostos orgânicos são também definidos e classificados pela sua temperatura de evaporação (EPA, 2019).

A família BTX, possui benzeno, tolueno e xileno que se assemelham em suas propriedades físico-químicas. O benzeno é um hidrocarboneto aromático composto por seis átomos de carbono e seis átomos de hidrogênio ( $C_6H_6$ ) em sua estrutura molecular. É bastante empregado na indústria como matéria-prima na fabricação de tintas e solventes. O tolueno

( $C_6H_5CH_3$ ) também chamado de metil benzeno, contém sete átomos de carbono e oito de hidrogênio em sua estrutura molecular aromática (ATIKINS, 1986).

Como características físico-químicas do tolueno, podemos citar que é um produto químico no estado líquido de cor clara ou incolor e com odor pungente levemente doce, detectável em baixas concentrações, quando exposto no ambiente. É menos denso que a água e altamente volátil, gerando rapidamente concentrações inflamáveis e tóxicas na temperatura ambiente (O'REIL, 2013).

Este composto é classificado como A4: não cancerígeno ao ser humano (NIOSH, 2018). O valor de concentração de seu limite de tolerância (LT) para exposição ocupacional de jornada diária de 8 horas foi determinado como 78 ppm (OSHA, 2018), porém, a sua inalação em altas concentrações próximas ao valor imediatamente perigoso à vida ou saúde (IPVS), que é de 500 ppm (CDC, 2018), informado pelo *The National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH), subordinado ao *Center for Disease Control and Prevention* (CDC) da *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA), pode ocasionar ao ser humano, sintomas tais como: como irritação aos olhos, pele, nariz e garganta, dor de cabeça, dificuldade respiratória, perda da consciência e até óbito (NIOSH, 2018).

As propriedades físico-químicas do tolueno, segundo o *Merck Index* (O'REIL, 2013) são:

- Massa molecular: 92,14 g.mol<sup>-1</sup>;
- Densidade a 25 °C: 0,888 g.mL<sup>-1</sup>;
- Temperatura normal de ebulição a 1atm: 110,8 °C;
- Solubilidade em água a 25 °C: 515 mg.L<sup>-1</sup>;
- Pressão de vapor a 25 °C: 22 torr.

Os vapores de tolueno ficam naturalmente dispersos no ar, na altura da região respiratória do trabalhador exposto e assim, pode penetrar facilmente pelas suas vias respiratórias no movimento respiratório de inalação. Uma vez dentro dos pulmões, são direcionados à circulação sanguínea, com potencial de absorção sistêmica, afetando severamente a saúde do trabalhador exposto (ATIKINS, 1986).

O tolueno possui várias aplicações na indústria. É usado na composição de tintas, selantes, solventes, removedores de tintas e gasolina. Os trabalhadores, como os pintores em suas atividades, são expostos ao risco químico pela presença do tolueno (EPA, 2019).

Na indústria, se utiliza a pintura mecanizada, onde a tinta é pulverizada por pressão do ar comprimido e forma *spray*, que é fornecido pela linha pneumática da rede local. A pressão da rede de ar comprimido industrial de  $5 \text{ kgf.cm}^{-2}$  é suficiente para promover a pulverização da tinta e aplicação pelo pintor que após verificar a qualidade da tinta, aciona o gatilho do revólver do mecanismo de aplicação da pintura, direcionando o *spray* de tinta na superfície da peça. Um dos objetivos da aplicação da pintura é a proteção de peças metálicas contra oxidações, impermeabilização e estética com aderência de cores que valorizam os produtos pintados, gerando aceitação pelo mercado consumidor (CHEMICALBOOK, 2017).

Com o desenvolvimento industrial, novas tecnologias foram aplicadas à área de pintura, como o uso de cabines que reduzem a concentração de VOCs e permitem que os filtros químicos dos EPRs utilizados pelos pintores tenham um maior tempo de uso para saturação. Outra tecnologia que está sendo aplicada nos processos industriais é o uso de robôs programados por comando lógico, que são braços mecânicos articuláveis com a pistola de pintura ajustada. Com esses robôs industriais, ampliou-se a produtividade e agora é possível a aplicação de maior diversidade de cores nas peças e partes dos produtos a serem pintadas. Portanto, a indústria tem investido de modo significativo nesses modernos equipamentos. Entretanto, como estas tecnologias demandam ajustes e manutenções na área da pintura industrial, por outros profissionais, que não são pintores, e estes também deverão utilizar os EPRs, ou seja, a modernização e automação do processo não eliminaram por completo a necessidade da utilização dos EPRs (TAUCITA et al., 2015; MENDES et al., 2017).

A recuperação por dessorção de VOCs nos GACs do filtro químico de EPRs tipo SF, é de grande importância, pois o seu descarte configura-se como um problema ambiental e econômico, já que, uma vez recuperados, estes podem potencialmente ser reutilizados no processo industrial. Além disso, os solventes ao se acumularem em espaços confinados, oferecem riscos, seja por sua toxicidade, seja por seu potencial de combustão, provocando explosões e incêndios (DABROWSKI, 2001; LI, 2002).

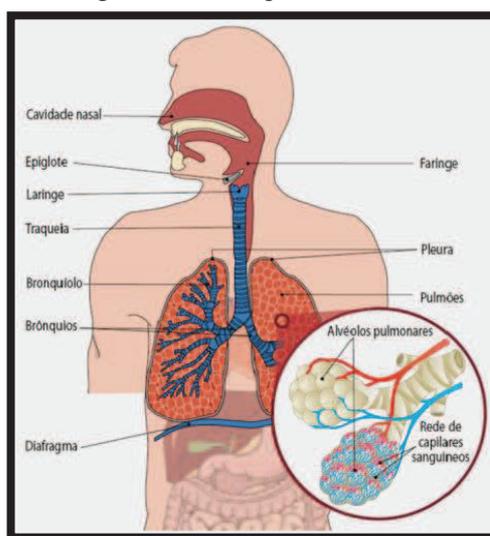
## **2.2 Compostos químicos e toxicologia ocupacional**

O conhecimento da probabilidade de uma substância e seus compostos químicos de causar um efeito adverso ao ser humano e no ambiente ou não, é fundamental para o estabelecimento de uma política racional de proteção da sociedade (SCHWARTZMAN, 2001).

No âmbito ocupacional, a exposição aos VOC pode causar efeitos agudos e/ou crônicos ao organismo, que podem ter intensidade aumentada na presença de fatores agravantes, como problemas respiratórios prévios, tais como asma, ou por certos hábitos alimentares, ou ainda o tabagismo. Em altas concentrações, muitos VOC são narcóticos potentes, e podem deprimir o sistema nervoso central (SNC). Exposições prolongadas podem também levar à irritação dos olhos e trato respiratório, causando reações de sensibilidade envolvendo os olhos, pele e pulmões (KLAASSEN, 2012).

Portanto, quando um trabalhador realiza atividades de pintura com o uso de tinta ou verniz a base de solventes orgânicos, seja pelo emprego de pincel ou da pistola pneumática, estará produzindo no ambiente de trabalho uma concentração potencialmente tóxica de VOCs, que, sem o uso do EPR, poderá penetrar pelas suas vias respiratórias podendo atingir rapidamente os alvéolos pulmonares (Figura 4), com conseqüente efeitos sistêmicos. Os efeitos sistêmicos serão de intensidade proporcional ao nível de exposição e à concentração do VOC presente no ambiente de trabalho (ALGRANTI et al., 2010).

Figura 4: Vias respiratórias



Fonte: SOBOTTA (2014)

De acordo com a Sociedade Americana de Químicos (ACS), no registro do *Chemical Abstract Series* (CAS), que é a identificação de todo produto químico comercializado mundialmente, há registros de mais de 139 milhões de substâncias químicas orgânicas e inorgânicas e 67 milhões de números codificados e classificados, cerca de 80 mil são de uso comum, seja na indústria, comércio ou no uso doméstico (KLAASSEN; WATKINS, 2012). Essas substâncias, dependendo das propriedades químicas ou físicas, podem ser absorvidas por

inalação, ingestão ou por contato dérmico. Apesar disso, o organismo humano, bem como da maioria das espécies por meio de seus sistemas enzimáticos, tem a capacidade de biotransformar e excretar esses compostos (RUPPERTHAL, 2013; OGA et al., 2014). Deste modo, o conhecimento da disposição das substâncias químicas no organismo, bem como de seus produtos de biotransformação, é de grande importância para a avaliação de sua toxicidade aos organismos vivos (MAGALHÃES, 2018).

Com relação às ocorrências associadas à manipulação destes compostos variados, dados da Organização Mundial da Saúde (OMS, 2018) estimam que ocorrem no Brasil cerca de doze mil casos diários de intoxicação e, como a previsão é de uma morte a cada mil casos, a conclusão é que cerca de doze brasileiros morrem todos os dias, intoxicados por medicamentos ou outras substâncias químicas, o que exige medidas preventivas e corretivas.

A toxicologia vem, portanto, ajudar a entender os efeitos nocivos causados pelas substâncias químicas ao interagirem com os organismos vivos, tendo por objetivo a avaliação do risco de intoxicação, estabelecer medidas de proteção coletiva e individual e procedimentos de segurança na utilização e conseqüentemente estabelecer medidas preventivas de intoxicação (RUPPERTHAL, 2013; OGA et al., 2014).

Com o resultado da avaliação ambiental dos contaminantes químicos presentes no ambiente de trabalho na forma de aerodispersóides, gases ou vapores, o administrador do PPR observará se os valores das concentrações ultrapassam o seu limite de ação, que corresponde à metade do valor do limite de tolerância (LT) de cada substância. Se estes valores forem ultrapassados haverá a necessidade do controle para neutralizar o potencial de toxicidade desses produtos químicos presentes na atmosfera de trabalho. As recomendações do PPR (FUNDACENTRO, 2016) que norteiam o administrador do programa, estabelecem a necessidade de investimentos na adoção de equipamentos de proteção coletiva (EPC) como o sistema de ventilação local exautora (VLE), adoção de rodizio de função para redução do tempo de exposição do trabalhador, adoção de equipamentos de proteção respiratória (EPR) em conjunto com outros equipamentos de proteção individual (EPIs) adequados a neutralização dos agentes presentes, bem como, o controle da saúde do trabalhador através do Programa de Controle Médico de Saúde Ocupacional (PCMSO) onde se faz o monitoramento biológico do trabalhador (SALIBA, 2014).

Para realizar a avaliação ambiental da concentração de VOC na atmosfera do trabalho e também na avaliação pessoal dos trabalhadores, os profissionais do Serviço Especializado em Engenharia de 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. O objetivo é de se avaliar a concentração dos VOC, à qual o trabalhador está exposto nas suas atividades desempenhadas no determinado ambiente de trabalho (SALIBA, 2014). Ao final desta análise os especialistas, de posse do relatório técnico do laboratório de HO contendo os teores dos compostos químicos, comparam estes valores com os limites de tolerância encontrados na legislação nacional ou internacional vigente (BRASIL, 1978) e em seguida estabelecem um plano de ação com as medidas de controle cabíveis (TORLONI; VIEIRA, 2003).

### 2.3 Uso de filtros químicos

Os filtros químicos utilizados em respiradores tipo peça semifacial (SF), os quais protegem o nariz e boca do usuário, fazem a retenção de moléculas de vapores orgânicos (VO) pelo processo físico de fisissorção. Estes filtros químicos oferecem a proteção respiratória ao trabalhador que desenvolve atividades em processos de pintura, seguindo orientação do PPR (FUNDACENTRO, 2016).

Segundo o PPR (FUNDACENTRO, 2016), o Fator de Proteção Requerido (FPR) do EPR é obtido pelo valor da concentração do contaminante presente no ambiente de trabalho pelo seu LT, conforme mostra a Equação 1. Este valor é obtido através de consulta as tabelas do anexo nº 11 da NR 15 (BRASIL, 2018c).

$$\text{FPR} = \frac{C}{\text{LT}} \quad (1)$$

Onde:

FPR = Fator de Proteção Requerido

C = Concentração do produto químico no ambiente de trabalho [ppm ou mg.m<sup>-3</sup>]

LT = Limite de Tolerância do produto químico [ppm ou mg.m<sup>-3</sup>]

O valor do Fator de Proteção Atribuído (FPA) do EPR é mostrado no Quadro 1 (FUNDACENTRO, 2016) e seu valor é fruto de estudos por meio de ensaios de vedação quantitativo e do material de vedação do corpo do respirador, sendo que os EPRs de pressão positiva fornecem fluxo de ar ao usuário, obtendo-se assim maiores valores de FPA comparados aos EPRs de pressão negativa (TORLONI; VIEIRA, 2003).

A comparação do valor do Fator de Proteção Requerido (FPR) calculado com o valor

do FPA estabelecido para cada tipo de EPR, segundo o critério de vedação e de pressão interna da cobertura facial, é determinante para a escolha técnica do respirador. O valor do FPA (Quadro 1) deverá ser maior que o valor do FPR, ou seja:  $FPA > FPR$ .

Quadro 1: Fator de Proteção Atribuído (FPA)<sup>(a)</sup> aos EPRs.

Tipo de respirador	Tipos de coberturas das vias respiratórias			
	com vedação facial <sup>(b)</sup>		sem vedação facial <sup>(b)</sup>	
	peça semifacial <sup>(c)</sup>	peça facial inteira <sup>(d)</sup>	capuz <sup>(e)</sup>	outros <sup>(f)</sup>
A – Purificador de ar não motorizado	10 <sup>(g)</sup>	100 <sup>(h)</sup>	—	—
motorizado <sup>(i)</sup>	50 <sup>(j)</sup>	1000 <sup>(k)</sup>	1000 <sup>(k)</sup>	25
B – de adução de ar				
B1 – linha de ar comprimido				
de demanda sem pressão positiva	10 <sup>(j)</sup>	100	—	—
de demanda com pressão positiva	50 <sup>(j)</sup>	1000	—	—
de fluxo contínuo	50 <sup>(j)</sup>	1000	1000	25
B2 – máscara autônoma (circuito aberto ou fechado)				
de demanda sem pressão positiva <sup>(l)</sup>	10 <sup>(j)</sup>	100	—	—
de demanda com pressão positiva	—	10000	—	—

Fonte: FUNDACENTRO (2016)

Onde:

- (a) o FPA só é válido quando o respirador é utilizado conforme as recomendações contidas no Programa de Proteção Respiratória (seleção correta, ensaio de vedação, treinamento, política da barba etc.) e com a configuração constante em seu Certificado de Aprovação (CA). O FPA não é aplicável para respiradores de fuga;
- (b) ver definição no Anexo 1 do PPR (FUNDACENTRO, 2016);
- (c) inclui as peças um quarto facial e semifacial reutilizáveis e a peça semifacial filtrante (PFF);
- (d) para respiradores com peça facial inteira aprovados somente no ensaio de vedação qualitativo, o FPA é igual a 10;
- (e) o FPA é 1000 para respiradores com cobertura das vias respiratórias que cobrem a face, a cabeça e se estendem até os ombros e, também para capuzes considerados com vedação facial (possuem uma peça semifacial em seu interior);
- (f) inclui capacete, protetor facial etc;
- (g) para respiradores com peças semifaciais reutilizáveis com, no mínimo, filtro P2 ou para peça semifacial filtrante, no mínimo, PFF2, o FPA é 10. Para respiradores com peças semifaciais reutilizáveis com filtro P1 ou para a PFF1, o FPA é 5. Para respiradores com peça um quarto facial, o FPA é 5, independentemente da classe do

filtro para partículas. (h) para respiradores com peça facial inteira, o FPA é 100 somente quando equipado com, no mínimo, filtro P2. Não se deve utilizar filtro P1 com esse tipo de respirador;

(i) não se deve utilizar filtros classe P1 com esse tipo de respirador;

(j) não se deve utilizar peça um quarto facial com esse tipo de respirador;

(k) os FPA apresentados são de respiradores com filtros P3 ou sorbentes (filtro químicos pequenos, médios ou grandes). Com filtros classe P2, deve-se usar FPA 100, devido às limitações do filtro;

(l) a máscara autônoma de demanda sem pressão positiva não deve ser usada para combate a incêndio ou situações IPVS.

Como na pintura tipo *spray* há a presença de aerodispersóides, partículas sólidas dos pigmentos que dão a coloração da tinta, além dos vapores orgânicos provenientes de solventes para a diluição desses pigmentos, havendo a necessidade do administrador do PPR adotar o uso do filtro de ação mecânica classe P2, combinado ao filtro químico, para a proteção do usuário. Portanto o FPA do EPR tipo SF com o filtro químico e disco de filtro P2, segundo o Quadro 1, revelou-se igual a 10, o que significa que o usuário poderá utilizar esse EPR com os respectivos filtros em concentrações de VO até 10 vezes o seu LT (FUNDACENTRO, 2016). Considerando o uso de tinta *spray* com solvente orgânico como o tolueno, cujo valor do seu LT é de 78 ppm para jornada de 48 horas de trabalho semanais (BRASIL, 2018c), limita-se o pintor industrial a trabalhar em local com concentração máxima de 780 ppm (FUNDACENTRO, 2016). O maior valor de FPA é conferido a máscara autônoma (MA), cujo valor é de 10.000, devido ao ar respirável contido sob pressão em seu cilindro, que é direcionado após a passagem pelas válvulas de redução de pressão, a peça facial inteira (PF) do usuário que irá inalar o ar respirável sob pressão positiva, ou seja, superior a pressão atmosférica. Em caso de possível acidente com perfuração do visor da PF, o usuário estará protegido e não inalará os contaminantes tóxicos e nem será asfixiado por deficiência de oxigênio (BREVIGLIERO et al., 2006).

Pela NR 06 (BRASIL, 2018a), o EPR em estudo deve conter a marcação indelével do número do Certificado de Aprovação (CA) emitido pela SEPT, mediante os ensaios no Laboratório de Ensaio de EPIs da FUNDACENTRO. De posse do Laudo de Ensaio de EPI emitido pela FUNDACENTRO, o fabricante ou importador de EPR, após anexar todas as documentações exigidas pela SEPT, receberá o respectivo número do CA conforme exigência da NR 06 (BRASIL, 2018a).

## 2.4 Avaliação de risco

A Norma Regulamentadora nº 09 (BRASIL, 2018b) estabelece que as empresas devem elaborar o 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 do nariz e boca dos trabalhadores expostos. São empregados a bomba gravimétrica com tubo contendo GAC, ou o monitor passivo, semelhante a um crachá de lapela (do inglês: *badge*) capaz de reter os VOC por adsorção do carvão ativado presente no disco interno do produto (BREVIGLIERO et al., 2006) ou utiliza-se tubos reagentes colorimétricos de acordo com o anexo nº 11 da NR 15 (Brasil, 2018).

Segundo o fabricante *Air Safety*, quanto à sua constituição, o EPR em estudo é composto de peça tipo SF e filtro químico que retém vapores orgânicos (VO), sendo que o corpo da peça SF é fabricado em material elastômero (borracha sintética), macio e antialérgico, fixado por tirantes elásticos, para pressionar o corpo da peça SF ao rosto do usuário, mantendo a boca e nariz do usuário protegidos do meio externo, oferecendo uma boa vedação e suporte (encaixe) ao filtro químico (SBPR, 2018). Este por sua vez acondiciona em seu corpo, o GAC, que reterá por adsorção, as moléculas do solvente, como o tolueno, utilizado na composição de tintas e vernizes (MOTTA, 2012).

Cada usuário possui um rosto com anatomia diferenciada (SOBOTTA, 2018) e, portanto, há a possibilidade de haver folga entre o contato do corpo de elastômero do EPR e a pele do rosto e nariz do usuário. Em função disso, o PPR (FUNDACENTRO, 2016) define critérios para se verificar a vedação do respirador no usuário. Um deles é denominado teste de vedação qualitativo, onde os pintores industriais serão conduzidos anualmente pelo administrador do PPR a realizar o ensaio com o uso do *kit fit-test* (dispositivo para teste de selagem) estabelecido neste programa. Este *kit* é composto por um capuz e dois nebulizadores com concentrações de sacarina ou *bitrex* líquidos que estão contidos em dois frascos. Um para o teste de sensibilidade com alta concentração e outro para ensaio em questão. A sacarina é um tipo de adoçante industrial aceito pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) (BRASIL, 2017). Já o *bitrex*, nome comercial de substância amarga (do inglês: *bitter*), utilizado para se evitar que o teste resulte em “falso positivo”, ou seja, quando o usuário do respirador não tem sensibilidade ao açúcar ou se alimentou com substâncias adocicadas (NATIVIDADE, 2011). Havendo a caracterização da folga, e, portanto, a possibilidade de penetração da sacarina

ou do *bitrex* ocasionada pela folga entre o respirador e o rosto do usuário, o administrador do PPR deverá especificar outro modelo de EPR. Após a aquisição dos novos modelos, os usuários farão novamente os mesmos testes, a fim de sanarem esse problema de vedação, pois se não o fizerem, o EPR fornecido perderá a sua finalidade de proteger o usuário contra a inalação de contaminantes tóxicos (FUNDACENTRO, 2016).

Para se evitar a penetração desses VOCs nas vias respiratórias dos trabalhadores, há a necessidade de impedir a passagem desses contaminantes, utilizando-se EPR com filtro químico impregnado com GAC. O GAC é um material sólido disposto em grãos, obtidos a partir de carbonáceos e utilizados como elemento tecnológico filtrante nos equipamentos destinados à proteção respiratória individual (SILVA, 2015).

A saturação do filtro químico deverá ser controlada pelo administrador do programa e assim, a reposição do filtro químico saturado deverá ser realizada antes do *breakthrough time* (tempo de saturação). Anotado esse intervalo de tempo, o administrador terá base de dados para determinar a data de validade do filtro químico quando o pintor industrial retira o novo do almoxarifado, para o início de suas atividades. Vencido o prazo de validade do filtro químico, o pintor deverá trocar o filtro químico saturado por um novo, sempre em local seguro e bem ventilado, ou seja, livre de contaminantes e só depois, retornar ao seu posto de trabalho, equipado novamente com o seu EPR completo (TORLONI; VIEIRA, 2003).

## **2.5 Carvão ativado granulado (GAC)**

Um tipo comum e econômico de composto que tem grande afinidade com compostos orgânicos é o GAC. O GAC é indicado como adsorvente para a filtração de VOC, como, por exemplo, o tolueno (BRINQUES, 2005). Os GACs são materiais sólidos dispostos em grãos, obtidos a partir de elementos carbonáceos e utilizados como elemento tecnológico adsorvente nos equipamentos destinados à proteção respiratória individual.

A superfície do carvão é essencialmente apolar, embora uma polaridade muito pequena surja da oxidação da superfície. Como resultado, o GAC também tende a ser hidrofóbico e organofílico e tem ampla utilização na adsorção de compostos orgânicos, como na filtragem de solventes, entre outras (RUTHVEN, 1984).

Tanto o carvão ativado pulverizado nas mantas dos respiradores filtrantes tipo PFF, quanto o granular utilizados nos filtros químicos dos EPRs tipo peça SF, são empregados para

reter VOCs e a qualidade destes carvões é tipicamente avaliada pela sua área superficial obtida pela isoterma de *Stephen Brunauer, Paul Hugh Emmett e Edward Teller*, conhecida como isoterma de BET (ATIKINS, 1986).

Independente da natureza, o carvão destinado à adsorção de compostos químicos deve sofrer ativação, que consiste no procedimento de limpeza dos poros, provenientes do processo inicial de mineralização. Este adsorvente é um material microcristalino produzido pela decomposição térmica de madeira e outros vegetais como cascas de coco de babaçu, seguida pela ativação com vapor ou dióxido de carbono a elevada temperatura. Eles são elaborados de tal forma a possuírem uma imensa rede de “orifícios” na superfície interna dos poros, constituindo uma grande área superficial. O GAC geralmente tem área superficial entre 300 a 1.200 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>, com diâmetro médio de poros compreendidos entre 6 a 10 Å (LÍLO-RÓDENAS et al., 2006).

O carvão de origem mineral pode ser proveniente de vários tipos de matérias-primas (carvões betuminosos, de lignite, etc.), são extraídos de minas de carvão e passam pelo processo de ativação, para se obter o produto final, com determinadas características específicas. Já o carvão de origem vegetal (madeira, turfa, caroço de azeitona, casca de coco, etc.) é carbonizado para se transformar em carvão, passando este material depois pelo processo de ativação, e eventual tratamento químico final. A porosidade e as características adsorptivas de determinado grau de carvão ativado são dependentes para a escolha da matéria-prima utilizada e do tipo de ativação e tratamento final a que ela é submetida, sendo diferentes tamanhos de carvão utilizados em cada aplicação específica (LEGNER, 2017).

Segundo Haghseresht et al. (2002) a adsorção de um composto químico no GAC é o resultado de uma inter-relação que depende tanto das propriedades do GAC quanto do agente químico a ser filtrado, além de fatores externos, entre eles a influência do pH.

Os carvões ativados são obtidos por meio de duas etapas básicas: a carbonização pela pirólise da matéria prima originária e a ativação propriamente dita. A carbonização consiste no tratamento térmico (pirólise) de precursor em atmosfera inerte a temperatura superior a 200 °C. É uma etapa de preparação do material, onde se removem componentes voláteis e gases leves (CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>), produzindo uma massa de carbono fixo e uma estrutura porosa primária que fornece a ativação posterior. Os parâmetros importantes que determinam a qualidade e o rendimento do produto carbonizado são a taxa de aquecimento, a temperatura final, o fluxo de gás de arraste e a natureza da matéria utilizada (CLAUDINO, 2003; SCHNEIDER, 2008).

A ativação, processo subsequente à pirólise, consiste em submeter o material carbonizado a reações secundárias, visando o aumento da área superficial. É a etapa fundamental na qual é promovido o aumento da porosidade do carvão. Deseja-se no processo de ativação, o controle das características básicas do material (distribuição de poros, área superficial específica, atividade química da superfície, resistência mecânica, etc.) de acordo com a configuração requerida para uma dada aplicação. Há dois tipos de ativação utilizados: ativação química e a física (LÁSZLÓ et al., 2005).

As propriedades de retenção de moléculas de solventes orgânicos no estado gasoso estão relacionadas diretamente a área superficial e ao tamanho e quantidade de poros, que são modificadas pelo processo de ativação assim como pelo tipo de matéria prima utilizada (FAULCONER, 2012).

Na ativação física o carvão é ativado mediante gaseificação parcial por gás carbônico e/ou vapor d'água superaquecido. Devido ao menor tamanho das moléculas de água em relação as de gás carbônico, ocorre um acesso mais fácil aos microporos e uma taxa de reação maior, o que faz com que a ativação física por vapor seja a preferida neste caso. Com a penetração das moléculas de vapor no interior dos microporos o volume adsorvido aumenta por causa da maior área superficial do carvão. De um modo geral, a ativação física produz uma estrutura de poro tipo fenda bastante fina, tornando os carvões assim obtidos apropriados para o uso em processo de adsorção de vapores (FOGLER, 1998).

Em relação à ativação química, o material a ser ativado é impregnado com substâncias químicas antes da pirólise, como o ácido fosfórico, hidróxido de potássio, cloreto de zinco, dentre outros. Na ativação química podem ser alteradas as características do carvão produzido. Este processo resulta em uma mudança na formação dos mesoporos e macroporos, sendo este tipo de ativação muito usada para a produção de carvões usados nos tratamentos de águas (AZARGOHAR; DALAI, 2011). A Tabela 1 informa a classificação para as dimensões dos poros do GAC, conforme a *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC, 2011).

Tabela 1: Classificação dos Poros (IUPAC)

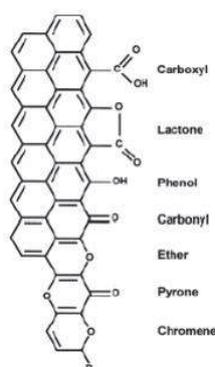
Microporos	0 a 2 $\eta\text{m}$ (0 a 20 $\text{\AA}$ )
Mesoporos	2 a 50 $\eta\text{m}$ (20 a 500 $\text{\AA}$ )
Macroporos	50 a 7.500 $\eta\text{m}$ (0,005 $\mu\text{m}$ a 7,5 $\mu\text{m}$ )
Megaporos	>7.500 $\eta\text{m}$ (7,5 $\mu\text{m}$ )

Fonte: IUPAC (2011)

A ativação química por cloreto de zinco ( $\text{ZnCl}_2$ ), tem se mostrado mais eficaz, sendo a substância mais usada na indústria. A partir da impregnação do carvão, cada reagente proporciona um determinado efeito na superfície do material durante a etapa de pirólise. O cloreto de zinco favorece o craqueamento na fase líquida, trabalhando como um agente desidratador que conduz à uma maior aromatização do material durante a pirólise. O ácido fosfórico afeta a decomposição pela pirólise desidratando o material e favorecendo a hidrólise ácida (GÜRSES et al., 2005).

Na superfície do carvão podem ser gerados radicais ácidos e alcalinos. Os ácidos estão associados ao oxigênio na superfície e possuem propriedade de troca de ânions, ao passo que, superfícies com baixo teor de moléculas de oxigênio são responsáveis por características básicas e efetuam trocas de cátions conforme mostra a Figura 5.

Figura 5: Grupos funcionais encontrados na superfície do GAC



Fonte: LILO-RÓDENAS et al. (2006)

Lilo-Ródenas et al. (2006) estudaram a adsorção de benzeno e tolueno no carvão ativado, o qual foi preparado a partir de diferentes materiais precursores e diferentes modos de ativação. Os estudos verificaram uma variação na adsorção dos compostos segundo os

diferentes carvões ativados. Os seus experimentos revelaram que um carvão ativado fisicamente com vapor adsorve 120 mg de benzeno e 190 mg de tolueno por g de GAC ativado, sendo que a concentração de vapor utilizada para cada composto orgânico foi de 200 ppm.

Uma vez ativado pelo fabricante, o GAC é embalado hermeticamente, para protegê-lo da possibilidade de adsorção de outras substâncias químicas e, principalmente da umidade presente na atmosfera do local de sua fabricação, uma vez que as moléculas do vapor d'água do ar ocuparão espaços nos poros do GAC e reduzirão a sua capacidade adsortiva antes de ser inserido no corpo dos filtros químicos de EPRs (LINDERS, 2007).

## 2.6 Mecanismo de adsorção do GAC

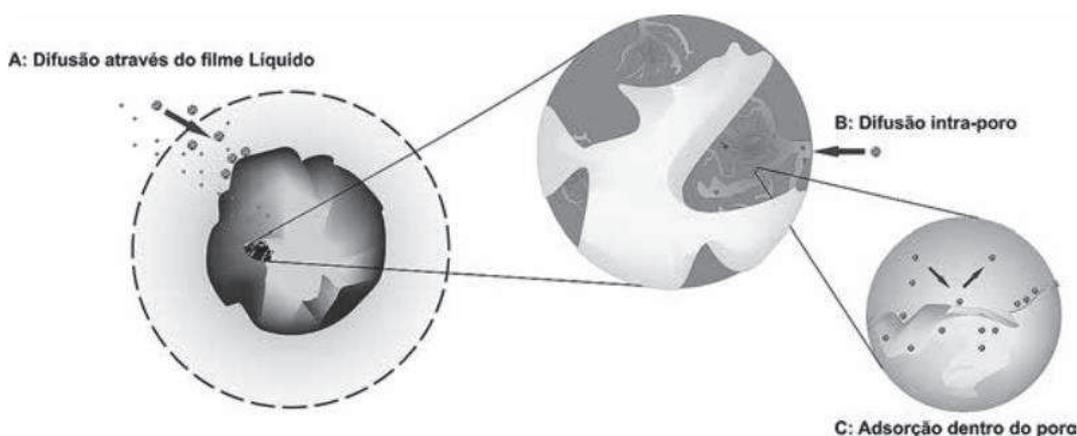
Para o fabricante de GAC *Calgon Carbon Corporation* (CCC, 2018), a adsorção é utilizada industrialmente devido ao elevado grau de remoção de certos componentes, tais como: desumidificação de gases, recuperação de vapores de solventes valiosos, branqueamento das soluções de açúcar, óleos vegetais e minerais, recuperação de vitaminas e de outros produtos contidos em mostos de fermentação, separação de gases raros, desodorização de gases, remoção de contaminantes em efluentes industriais e filtração de vapores orgânicos em EPRs, entre outros.

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 (fisissorção), causada principalmente por forças de Van der Waals, 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 (ATIKINS, 1986).

Outra possibilidade é a adsorção química (quimissorção), onde há o envolvimento de interações químicas entre o fluido adsorvido e o sólido adsorvente, com a transferência de elétrons, equivalente à formação de ligações químicas entre o adsorbato e a superfície do sólido (LILO-RÓDENAS et al., 2006).

A cinética de adsorção é expressa como a taxa de remoção do adsorbato na fase fluida em relação ao tempo, envolvendo a transferência de massa de um ou mais componentes contidos em uma mistura líquida externa para o interior da partícula do adsorvente, os quais deverão migrar através dos macroporos até as regiões interiores desta partícula. Em princípio, a cinética de adsorção pode ser explicada por diferentes processos. Primeiramente a transferência de massa externa: a qual corresponde a transferência de moléculas da fase fluida para superfície externa da partícula adsorvente, por intermédio de uma camada de fluido que envolve a partícula. A segunda etapa consiste na difusão no poro: a qual é ocasionada pela difusão de moléculas no fluido para o interior dos poros. Finalmente ocorre a difusão na superfície: a qual corresponde à difusão das moléculas totalmente adsorvidas ao longo da superfície do poro (Nascimento et al., 2014), como mostra a Figura 6.

Figura 6 - Etapas da cinética de adsorção



Fonte: NASCIMENTO et al. (2014)

Na prática, observa-se que os adsorventes mais utilizados apresentam vasta distribuição de tamanhos de poros no interior das partículas adsorventes e vários mecanismos de difusão têm lugar, dependendo do tamanho relativo da molécula do adsorbato em relação ao tamanho do poro (NASCIMENTO et al., 2014).

No processo de adsorção em carvão ativado há a adesão de moléculas do fluido dos VOC sobre a superfície dos poros do GAC sólido e a adsorção pode ocorrer na interface entre duas fases distintas: gás-sólido e líquido-sólido (MACINTYRE, 1990). Partículas sólidas líquidas de dimensões pequenas possuem uma película superficial de vapor, a qual é mantida devido à ação de forças elétricas de atração ou pelas condições de valência química originadas na camada superficial das moléculas.

### 2.6.1 Estudos de adsorção de GAC

Há muitos materiais adsorventes comercializados, entre os quais se incluem adsorventes simples como sílica gel, alumina ativada e GAC e, também são citados alumino e silicatos cristalinos. No entanto, há diferenças fundamentais entre estes materiais, levando a significativas diferenças nas eficiências de adsorção e que são importantes para a escolha do material adsorvente. Entre as propriedades que afetam as características de adsorção, por exemplo, o tamanho e distribuição dos poros (ATKINS, 1986).

Pesquisando materiais de maior adsorção, outros estudos foram realizados (MARSH, 2006) cujos autores investigaram materiais de fácil aquisição que possam dar origem a GAC com excelente capacidade adsorptiva de VOC. Foram utilizadas como filtros, carvões com aberturas de 10 e 20 mesh. Os carvões foram obtidos a partir de casca de noz pecam (ativados por uso de vapor, gás carbônico e ácido fosfórico) e, de amêndoa (ativado por ácido fosfórico) e foram comparados com outros GAC comerciais. Os dados obtidos indicaram que as ativações do carvão de casca de noz pecam por vapor ou gás carbônico resultou em maiores valores de capacidades de adsorção de VOC, quando comparados com a ativação por ácido fosfórico. Os carvões de casca de noz pecam ativados por vapor d'água resultou em maior capacidade adsorptiva de VOC e foi semelhante à dos GAC comerciais, produzidos a partir de casca de coco (RODRIGUEZ-REINOSO, 2006).

Benkhedda et al. (2010) obtiveram dados de isoterma de equilíbrio de adsorção de tolueno em fase gasosa, utilizando nitrogênio como gás de arraste, a partir das curvas de ruptura a 25 e 35 °C. A temperatura da coluna foi mantida constante em 274 °C, pela utilização de um banho termostático. Antes do início do experimento, o nitrogênio que entrava na coluna era analisado por cromatografia gasosa. Quando a concentração do gás se tornava constante, o experimento de adsorção tinha início. Neste trabalho, as isotermas também foram obtidas a temperatura de 45 e 55 °C. O GAC tinha a forma cilíndrica de *pallets* (dimensões aproximadas de: 2 mm de diâmetro e 4 mm de comprimento), alcançado área superficial interna próxima a  $1.300 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  e as isotermas obtidas apresentaram formato convexo e favorável.

Segundo Ying (2015), o GAC é um versátil adsorvente 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 filtros químicos de EPRs com a finalidade de retenção de VOC por adsorção.

Estes estudos tentando explicar e definir os melhores adsorventes de vapores orgânicos, bem como estabelecer os parâmetros físicos mais adequados, também foram realizados com adsorventes alternativos. Brum et al. (2008), por exemplo, realizaram ensaios de adsorção em carvão obtido a partir do reaproveitamento de resíduos do beneficiamento de café e concluíram que a capacidade adsortiva deste carvão ativado comparado ao comercial, apresentou capacidade adsortiva que foi proporcional à temperatura aplicada, mostrando significativo aumento quando a temperatura variou de 10 para 60 °C, mostrando a natureza endotérmica das reações. Considerando-se a distribuição do diâmetro do poro, foi observado que a maioria dos poros possuíam tamanho inferior a 20 Å (microporos), o que lhe confere maior área superficial correspondendo a mais de 70% da área total do carvão produzido a partir deste processo.

Em estudo mais recente, Balanary et al. (2015) verificaram que a capacidade de adsorção de mantas de fibra e de feltro impregnadas com GAC em pó, usando tolueno como adsorbato em diferentes teores de umidade relativa. Os parâmetros dos ensaios realizados foram concentração de tolueno de 50 ppm, temperatura de 23 °C, umidade relativa (UR) de 50% e fluxo de ar de 60 L. min<sup>-1</sup>. Concluíram que as mantas de feltro apresentaram uma vantagem de demorarem 10% a mais de tempo para a sua saturação com o tolueno em relação as mantas de fibras, devido à maior densidade de CAG impregnado.

## 2.7 Estudos de regeneração de GAC

Okawa et al. (2007) realizaram estudos de regeneração de GAC adsorvente de tricloroetileno (C<sub>2</sub>HCl<sub>3</sub>) como adsorbato, utilizando peróxido de hidrogênio como agente de dessorção, controlando em laboratório, os parâmetros de pH (2, 3 e 4) na temperatura fixa de 180 °C, onde os resultados mostraram uma eficiência de 71, 60 e 48 % respectivamente. Estes resultados sugerem que regeneração de GAC é mais efetiva com alta temperatura em concentração de peróxido de hidrogênio em solução com o cloreto de metileno com menor valor de pH (solução ácida).

O uso de radiação por micro-ondas foi explorado como ferramenta para arraste e dessorção da metil etil cetona de CAG (TAI; LEE, 2007), o que se mostrou eficiente para a regeneração de fitos químicos.

Além desses Horng e Tseng (2008) testaram um sistema aquoso, onde o álcool isopropílico foi inserido como adsorbato e um aparelho foto reator foi o agente empregado para a regeneração de GAC saturado. Por meio da recirculação de água a reação de regeneração foi operada utilizando luz ultravioleta intermitente e incidência contínua. O sistema se mostrou além de eficiente na regeneração de GAC, também como um bom catalisador do adsorbato e com a vantagem adicional de se reutilizar a água.

Hori et al. (2010), em seus estudos, testaram um único filtro químico preenchido com GAC, submetendo-o a saturação por cinco diferentes tipos de vapores orgânicos (metanol, 2-propanol, acetona, diclorometano e acetato metílico), a maioria dos quais possui características de baixa percepção por odor e baixa afinidade com carvão. O filtro químico foi submetido a estes compostos químicos a temperatura de 25 °C, com umidade relativa de vapor em torno de 50%. Quando o fluxo de vapor de determinado composto saturou o filtro químico até o limite de tolerância admitido no Japão, o suprimento de vapor foi interrompido. Em seguida, o processo de dessorção foi iniciado pela introdução de vapor d'água pelo lado oposto do filtro químico saturado, sob condições de aquecimento. Quando o vapor do produto químico foi retirado do CAG e sua concentração atingiu valores abaixo do LT, o processo de dessorção foi encerrado. O procedimento foi repetido com os demais compostos em testes. O CAG foi submetido ao aquecimento na temperatura de regeneração que foi de 65° C, sendo que os fluxos de vapor d'água na dessorção utilizada no experimento foram com valores de umidade relativa de 20%, 50% e 70% na temperatura de 25°C. Quando a umidade relativa foi de 20%, o tempo para a regeneração dos filtros químicos reutilizados foi menor do que os filtros químicos novos. Os autores sugerem que o acondicionamento térmico dos filtros químicos de EPR usando vapor d'água foi possível para os cinco reagentes químicos estudados.

### *2.7.1 Destinação dos EPRs como resíduos sólidos*

A ideia de aproveitar resíduos de produtos não é nova e, por pressão dos *stakeholders* (do português: partes interessadas), constituídos pelo mercado consumidor, acionistas, imprensa e agências governamentais, tem ganhado mais relevância, não só por razões econômicas, mas também como uma forma de minimizar os impactos ao Meio Ambiente (PIVA; WIEBECK, 2004).

A reciclagem pode ser um negócio lucrativo e para tanto, há de se estudar previamente a viabilidade econômica do projeto de reciclagem de material usado, para que volte ao ciclo produtivo como matéria prima secundária, seguindo todas as fases desde a captação, transporte, processo industrial na recicladora e venda para o mercado como matéria prima secundária. Na empresa recicladora faz-se o beneficiamento primário do resíduo, onde o material captado é agrupado no pátio de recepção, em uma área pavimentada, para se evitar contaminação com a terra e outras sujidades, com drenagem pluvial e um galpão. Esse pátio funciona como um pulmão, armazenando material de entrada e saída do processo (PIVA; WIEBECK, 2004).

Pela legislação ambiental, todo produto contaminado com resíduo de hidrocarboneto deve ser descartado em local apropriado, ou seja, aterro sanitário Classe I ou incinerador. Portanto, o símbolo de reciclagem preconizado pela norma NBR 13.230 (ABNT, 2009a) impresso na embalagem do filtro químico é a única orientação quanto ao descarte e preconiza apenas o descarte da embalagem que é de plástico ou papelão, porém o material do corpo do filtro químico e o próprio GAC não são mencionados. Este fato provavelmente ocorre porque o fabricante de EPRs não se responsabiliza pelo descarte de seu produto usado, pois o mesmo foi contaminado pelo seu cliente e, portanto, se tornou um resíduo sólido perigoso do cliente, a responsabilidade e custos do descarte estão por conta do usuário, no caso seu cliente.

Segundo Shibao et al. (2010), na atualidade no setor empresarial o tema que mais se destaca relaciona-se ao problema da sustentabilidade. Cresce a consciência de que os recursos do planeta são finitos e, caso não se tome providências para controle da poluição e do aquecimento global, é possível que a vida na terra se torne inviável. Em função deste fato, há também um grande interesse em torno do tema “logística reversa”.

O termo logística reversa da PNRS pode ser definido como o processo de planejamento, implantação e controle eficiente e eficaz dos custos, dos fluxos de matérias primas, produtos em estoque, produtos acabados e informação relacionada, desde o ponto de consumo até um ponto de reprocessamento, com o objetivo de recuperar valor ou realizar a disposição final adequada do produto (BRASIL, 2010).

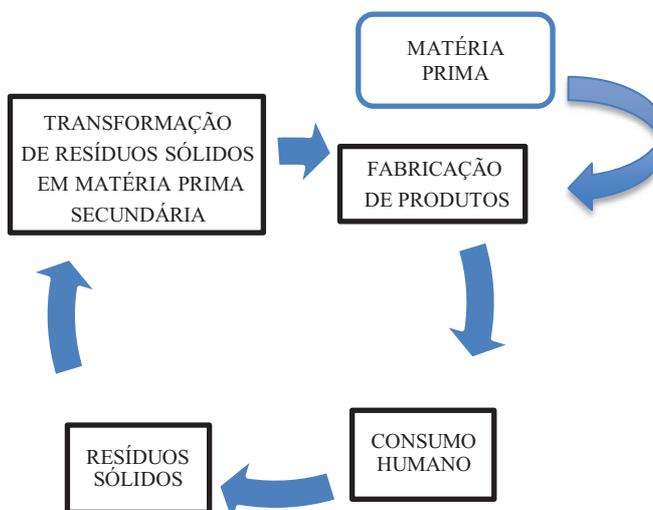
A viabilidade econômica para que os fabricantes de EPRs atuem no conceito da logística reversa (BRASIL, 2010) depende da diferença entre os custos de fabricação do filtro químico tradicional, comparado com os custos do filtro químico, que utilizará o GAC regenerado, como matéria prima secundária. Neste cálculo financeiro, deverão ser observados os custos indiretos para a importação de GAC novo.

Com os problemas ambientais, a fim de abordar e encontrar soluções necessárias para a proteção do meio ambiente há alternativas de exploração de materiais com o conceito de *ecodesign*. Cientistas, gestores e projetistas questionaram a eficácia do *design* atual e introduziram inovações e criatividade como alternativas. No final do século XX, o poder do *design* para resolver o problema e o potencial do *ecodesign* para a sustentabilidade foram relevantes (NAIME et al., 2012).

Iniciou-se uma integração de processos, materiais e reutilização dos mesmos ao projeto de novos produtos, com funções ecológicas. O *design* e o seu potencial foram considerados uma atividade criativa de resolução de problemas. Enquanto as ciências ecológicas fornecem conhecimento e orientação, o *ecodesign* oferece soluções criativas para os problemas ambientais, propondo o desenvolvimento sustentável, utilização de material reciclável e a redução do consumo de matérias primas da natureza (AEP, 2013).

Kirchherr et al. (2017), em 100 artigos pesquisados, encontraram o termo economia circular (EC) presente em 114 definições de conceitos técnicos, o que revelou que a EC é um tema atual na direção da sustentabilidade dos produtos fabricados, consumidos e sua destinação final. Representa a redução ou a eliminação do consumo de novas matérias primas, pois o objetivo é possibilitar a transformação do GAC regenerado, demais componentes do filtro químico e do solvente recuperado em matéria prima secundária pelo fabricante de EPR ou empresa recicladora, a ser utilizada em processos de fabricação de produtos novos (Figura 7), com o conceito de economia circular (EC).

Figura 7: Conceito da Economia Circular (EC)



Fonte: Autor

Considerando que a quantidade total em 2017, de filtros químicos fabricados por empresas brasileiras e importados, foi superior a 3.000.000 de peças (ANIMASEG, 2017), há uma oportunidade de melhoria nas ações de consumo e práticas ambientais, para as quais essa pesquisa pretende contribuir, sensibilizando os *stakeholders* a reduzirem o descarte de filtros químicos de EPRs tipo peça SF saturados após o uso nas atividades de pintura com tintas à base de solventes orgânicos em sua composição. Deste modo, haverá a possibilidade das empresas recicladoras utilizarem o método de regeneração proposto, transformarem o GAC e demais componentes do filtro químico saturado em matéria prima secundária, evitando-se o descarte em aterros sanitários ou incineradores, utilizando o conceito da EC, contribuindo com a sustentabilidade, reduzindo-se a extração de matérias primas da natureza (KIRCHHERR et al., 2017).

O presente estudo almeja propor um método para inserir o filtro químico saturado em empresas Recicladoras, para que o mesmo, após ser submetido ao processo de regeneração desenvolvido neste trabalho, passe a ser considerado material reutilizável e reciclável, transformando-o em matéria prima secundária útil, retornando ao processo de fabricação de novos filtros químicos nas indústrias fabricantes de EPRs ou os componentes do filtro químico, uma vez regenerado, poderá servir em outros processos industriais para a fabricação de outros produtos, diminuindo o consumo de matérias primas da natureza e com a consequência de redução da importação de GACs.

## **2.8 Aspectos ambientais**

Após a saturação do filtro químico do respirador utilizado, o EPR é classificado como resíduo sólido Classe I. De acordo com a norma NBR 10.004 (ABNT, 2004), conforme exemplificado no fluxograma da Figura 8. Portanto após saturado, o filtro químico deverá ser retirado do EPR e armazenado em local apropriado. Nas datas de coleta, serão destinados a aterro sanitário ou incineração.

Figura 8: Fluxograma para a classificação do resíduo sólido



Fonte: NBR 10.004 (ABNT, 2004)

Segundo Piva e Wiebeck (2004), conhecer os tipos de resíduos e os volumes gerados é fundamental para iniciar um bom Gerenciamento de Resíduos Sólidos (GRS).

Trabalhar no intuito de reduzir estes custos melhora os resultados das empresas e, conseqüentemente, mantém o negócio competitivo. Em geral, os objetivos de um programa de GRS são a maximização de eficiência e a redução dos impactos negativos ambientais e do negócio (BARBOSA; IBRAHIN, 2014).

Pelas normas NBR 12.809 (ABNT, 2013) e NBR 10.004 (ABNT, 2004), o resíduo que não for classificado como classe I (perigoso) pode ser tratado como lixo comum e, portanto, ser descartado no lixo comum ou no esgoto urbano. Entretanto, quando se trata de resíduos químicos, deve-se ter cuidado e bom senso. É importante atender a legislação pertinente, isto é fazer a segregação e a destinação correta, evitando-se a contaminação do solo, lençóis freáticos e da atmosfera.

As empresas buscam tecnologias para a redução de seus resíduos e consumo de energia elétrica, o que lhes garantem a almejada certificação ambiental da ISO 14.001 (ISO, 2017), porém, no caso de fabricantes de respiradores, não há o retorno dos filtros químicos usados pelos seus clientes, por meio de logística reversa, visto que os filtro químicos usados estão saturados com solventes orgânicos tóxicos. Neste caso, o procedimento do SESMT é o de descartá-los em recipientes apropriados e armazená-los com identificação de resíduo perigoso para depois de acumulado, destiná-los em aterro sanitário ou incineradores, seguindo a NBR 12.235 (ABNT, 1992).

O armazenamento temporário deste tipo de resíduo deve ser realizado em áreas cobertas e bem ventiladas, de forma a não alterar a sua quantidade e qualidade. Como há VOC retidos nos GAC, recomenda-se não armazenar em recipientes herméticos, como sacos de plásticos ou tambores com tampas, visto a sua evaporação pode atingir o limite inferior de explosividade (LIE) e na presença de fonte de ignição como faísca, chama ou mesmo reação química exotérmica com outros compostos, há a possibilidade de explosão. Portanto, os filtros químicos saturados são descartados. No Estado de São Paulo, as empresas devem seguir a legislação ambiental da Companhia Estadual de Saneamento Básico (CETESB). O descarte apropriado é através da sua queima em incineradores de empresas autorizadas pela CETESB ou transportados a um aterro sanitário classe I. Todos os custos inerentes ao descarte do filtro químico saturado são das empresas consumidoras de EPR. Para se conseguir reduzir o volume de resíduos sólidos, deveriam ser seguidos os seguintes procedimentos: reduzir o uso de materiais não recicláveis; substituir materiais descartáveis por materiais mais duráveis ou reutilizáveis; reduzir embalagens; minimizar a geração de lixo de jardins; por parte de governos, implementar medidas não muito simpáticas à população com a implementação de taxas para a cobrança de lixo por volume ou por peso; aumentar a eficiência no uso de materiais, tais como: papel, vidro, plástico e metais; a criação de mercados locais ou regionais para os principais produtos, lixo, por exemplo, papel, vidro e metal. A complexidade consiste em como dar destinação ao lixo tanto doméstico quanto comercial e industrial. As piores soluções referem-se a enviá-lo para aterros sanitários, bem como a incineração. As chamadas melhores soluções envolvem a redução da geração de resíduos, conscientizando as pessoas, para a reciclagem e compostagem (MOURA, 2011).

O descarte final de filtros químicos saturados e demais resíduos industriais em aterros sanitários e incineradores industriais causam outros problemas ambientais. Deve-se ressaltar que a disposição de resíduos nos aterros sanitários em geral, obedece ao fenômeno internacionalmente conhecido como *Not in My Back Yard* (NIMBY). Esses aterros, contaminados com solventes que produzem VOCs se constituem em fontes de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE), havendo também proliferação de vetores e potenciais doenças associadas, sem falar que após seu encerramento há a possibilidade de passivos ambientais (COSTA; RIBEIRO, 2013).

Para Soluri e Neto (2015), o GRS é uma preocupação do governo, indústria e sociedade, pois o volume de resíduos gerados tem aumentado significativamente com o desenvolvimento industrial. Desta forma o tratamento e a disposição correta desses resíduos

vêm se tornando um desafio para os profissionais da área técnica.

O instrumento que aprova o encaminhamento de resíduos de interesse a locais de reprocessamento, armazenamento, tratamento ou disposição final, licenciados ou autorizados pela CETESB chama-se Certificado de Movimentação de Resíduos de Interesse Ambiental (CADRI), que é obrigatório para todo tipo de resíduo de interesse ambiental, ou seja, que prejudica o meio ambiente e a saúde (BARBOSA, 2014)

Segundo o anuário Indicadores do Mercado Brasileiro de Equipamentos de Proteção Individual (ANIMASEG, 2017), as empresas fabricantes de EPRs pertencentes ao quadro da Associação Nacional da Indústria de Material de Segurança e Proteção ao Trabalho (ANIMASEG), informaram que comercializaram no ano de 2017 a quantia de 3.000.000 de filtros químicos. Considerando que em cada filtro químico contenha aproximadamente 90 g de GAC ( $M_{gac}$ ), há uma estimativa de 270 t de  $M_{gac}$  descartada naquele ano em aterros sanitários, incineradores e, possivelmente, uma parte deste total, em lixões sem controle ambiental, possivelmente pelo fato de que nem todos os usuários de EPRs trabalham de acordo com as normas de controle ambiental (GOUVEIA, 2015).

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Local de realização do trabalho

Este trabalho consiste de uma pesquisa experimental e seu desenvolvimento foi realizado nos Laboratórios de Tecnologia do Vácuo (LTV) e de Saneamento (Departamento de Hidráulica e Saneamento), localizados na FATEC São Paulo, do município de São Paulo, cujas instalações foram adequadas para a montagem do arranjo experimental.

### 3.2 MATERIAIS

#### 3.2.1 Amostras

O critério adotado para a escolha das amostras de filtros químicos utilizados nos ensaios de regeneração foi o de que as amostras fossem obtidas de um fabricante nacional, sendo o GAC importado, de um mesmo lote, utilizado em peça SF de EPR com Certificado de Aprovação (CA), válido. O número de amostras de filtros químicos foi definido como sendo cinco, por serem suficientes para se obter dados estatísticos dos índices de regeneração (IR) e do coeficiente adsorativo (Ca) para cada filtro químico. O número de ciclos de ensaios de regeneração foi definido como quatro para cada filtro químico testado, suficientes para se obter os valores de IR e o Ca médios. Quanto ao solvente utilizado nos ensaios, o critério de escolha foi o de que fosse um composto largamente utilizado em tintas e vernizes e que participasse com mais de 10% na composição química desses produtos.

Vários fabricantes nacionais e empresas estrangeiras com filiais no Brasil, que fabricam os filtros químicos no território brasileiro, foram contatadas pelo autor e o fabricante nacional *Air Safety*, pertencente ao grupo Sistema Brasileiro de Proteção Respiratória Ltda. (SBPR), forneceu gentilmente as amostras de filtros químicos, que se enquadram nos critérios estabelecidos para a realização dos experimentos. As amostras de estudo foram, portanto, constituídas por cinco filtros químicos contendo GACs para a retenção VOCs sob o código 514.367, modelo 2000 A1, lote 01/2017, válido até 01/2022, com Certificado de Aprovação (CA) nº 5757. Este modelo de filtro químico é utilizado em conjunto com a peça SF, formando o conjunto de EPR modelo *Air Tox II*, ilustrado na Figura 9.

Figura 9: Peça SF modelo *Air Tox II*, com o filtro químico encaixado, constituindo o EPR.



Fonte: SBPR (2018)

A Figura 10 ilustra o modelo do filtro químico, em sua embalagem original, utilizado nos ciclos de ensaios desenvolvidos no arranjo experimental.

Figura 10: Filtro químico novo em sua embalagem original



Fonte: Autor

O adsorvente do filtro químico da *Air Safety* utilizado neste experimento é o GAC importado da empresa CCC (Figura 12), e o adsorbato escolhido para o experimento foi o solvente orgânico tolueno a 99,5% vol., que foi adquirido do fabricante nacional Dinâmica Química. As características técnicas de segurança, toxicológicas e ambientais definidas pela Ficha de Informação de Produto Químico (FISPQ), conforme a norma NBR 14.725-4 (ABNT, 2009b; DINÂMICA QUÍMICA, 2018). A Figura 11 mostra a pipetagem do tolueno, realizada para completar o volume de 100 mL no interior do kitassato (Câmara 1).

Figura 11: Uso do solvente orgânico tolueno



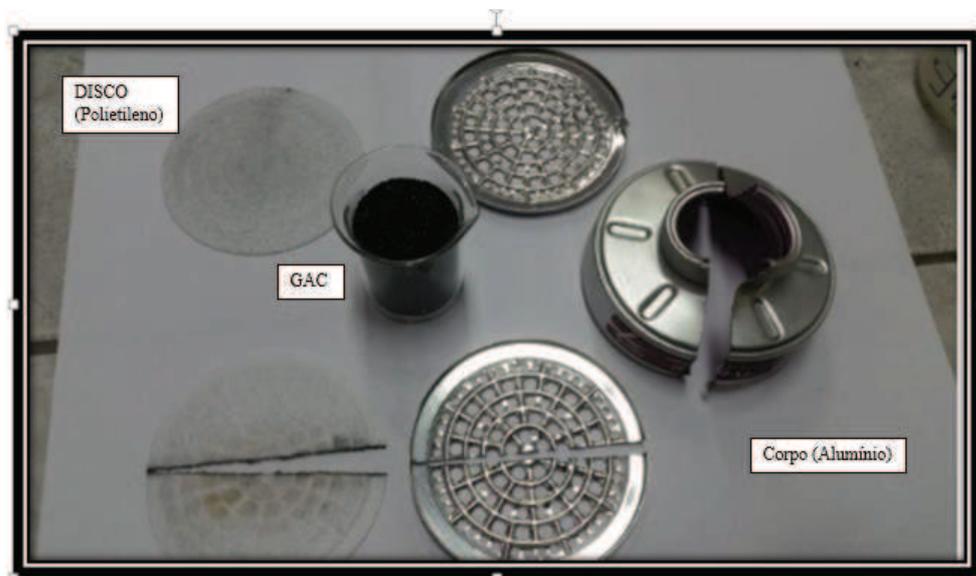
Fonte: Autor

Cada amostra de filtro químico utilizada nos ensaios, é constituído dos seguintes componentes:

- Corpo cilíndrico metálico, fabricado com folha fina de alumínio de 70 mm de diâmetro;
- 02 tampas metálicas vazadas, com dimensões aproximadas de 68 mm de diâmetro, com furos de 03 mm de diâmetro, para a passagem do ar inalado pelo usuário do EPR;
- 02 discos de polietileno com dimensões aproximadas de 68 mm de diâmetro e 0,1 mm de espessura.

A Figura 12 ilustra os componentes de um dos filtros químicos usados, que foi desmontado após a realização do último ensaio de regeneração ocorrido no arranjo experimental e estufa e seus componentes separados.

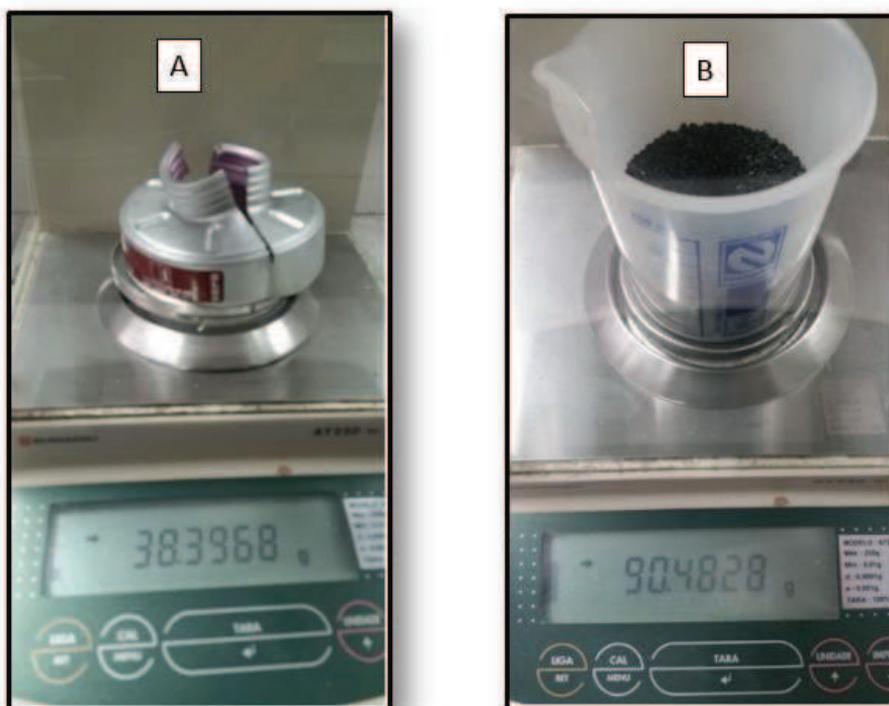
Figura 12: Componentes do filtro químico



Fonte: Autor

A massa do carvão ativado GAC ( $M_{gac}$ ) inserido no corpo dos cartuchos dos 05 filtros químicos foi em média de  $(90,48 \pm 0,28)$  g e a massa do corpo e de suas 02 tampas de alumínio resultou em média no valor de  $(38,12 \pm 0,73)$  g. A Figura 13 ilustra a pesagem do corpo de alumínio e do GAC que foi retirado de um filtro ensaiado.

Figura 13: Pesagem do corpo e tampas de alumínio do filtro químico (A) e do GAC (B)



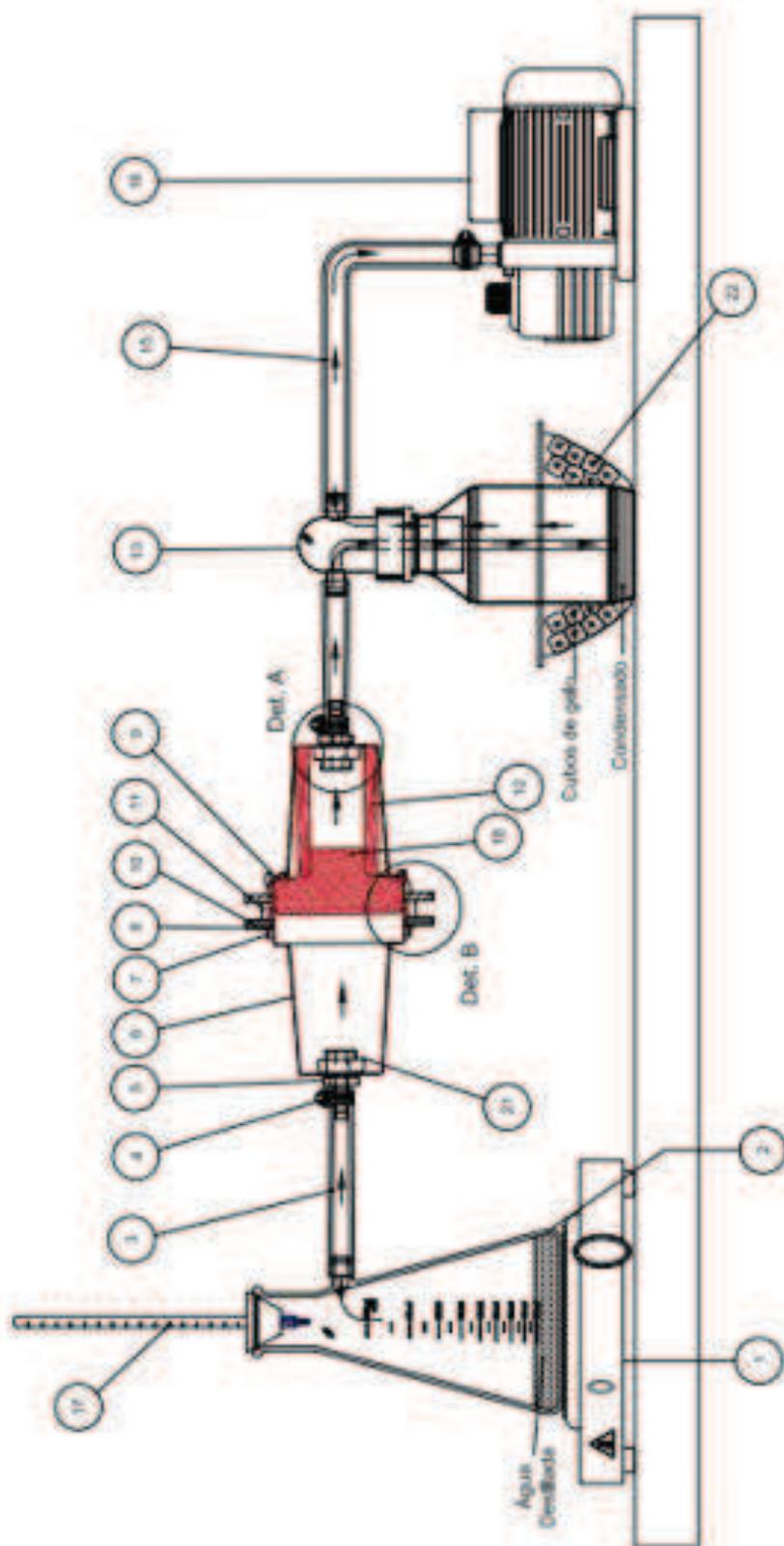
Fonte: Autor

O formato do grão do carvão ativado (GAC) é prismático com dimensões aproximadas de 1 a 3 mm. Segundo a empresa SBPR, no processo industrial, para cada filtro químico, os grãos de GACs importados foram inseridos por ação da gravidade e prensados em seguida por um dispositivo pneumático, e após essa fase, foi conformada por estampagem, a tampa externa de alumínio no corpo do filtro, junto com os 02 discos de polietileno, cuja função é a retenção dos grãos de carvão no corpo do filtro químico. A pressão de fechamento do filtro químico empregada deverá ser suficiente para compactar o carvão sem que haja o seu cisalhamento, o que, causaria redução de sua ação de adsorção de moléculas de solventes, pois haveria folga entre os grãos de GACs e parte de seus poros estariam preenchidos pelo pó de carvão cisalhado, o que seria indesejável, uma vez que parte dos GACs deixaria de ser ativado. A consequente redução da sua capacidade adsortiva de VOCs, acompanhada pela redução no tempo de saturação ou *breakthrough time*, tornaria o filtro químico, nestas condições, impróprio para a sua comercialização. Os GACs dos filtros químicos devem ter a capacidade de atrair e reter volumes apreciáveis de VOCs, sem gerar pó no manuseio do filtro, e manter estáveis tais propriedades nas condições normais de fabricação, estocagem e uso (TORLONI; VIEIRA, 2003).

### 3.2.2 Arranjo experimental

O arranjo experimental utilizado para a realização dos ensaios de adsorção (saturação dos GACs com uso de VOC do solvente tolueno) e dessorção, por meio do arraste de VOC por vapor d'água, ocorrido nas cinco amostras de filtros químicos, foi constituído dos seguintes materiais, equipamentos, dispositivos e acessórios, ilustrados na Figura 14.

Figura 14: *Layout* do arranjo experimental



ÍTEM	DESCRIÇÃO
1	Aquecedor de placa NALCON, modelo 1620, 220 V / 700 W, regulado a temperatura de 120 °C
2	Kitassato (Câmara 1) com solvente tolueno ( no ensaio de adsorção) e outro Kitassato com água no (ensaio de dessorção)
3	Mangueira de silicone
4	Abraçadeira metálica
5	Porca de vedação
6	Dispositivo com 02 copos de alumínio (Câmara 2) para encaixe do filtro químico VO
7	Anel metálico
8	Parafuso tipo borboleta
9	Parafuso tipo <i>allen</i>
10	Placas de alumínio para acoplamento
11	Anel de vedação de <i>viton</i> ®
12	Tubo de <i>nylon</i> ®
13	Frasco coletor tipo DRECHSEL 500 mL
14	Anel de vedação de <i>viton</i> ®
15	Mangueira de silicone
16	Bomba de Vácuo modelo G-50D, SINKKU KIKO CO, 115 V/60 Hz, 200 W, 4 polos, vazão de 60 L.min <sup>-1</sup> , pressão de 1.10 <sup>-3</sup> Torr
17	Termômetro de mercúrio escala -5 a 200 °C
18	Filtro químico 2000 A1, utilizado no EPR <i>Air Tox II</i> da <i>Air Safety</i>
19	Arruela metálica
20	Anel de vedação
21	Porca de fixação
22	Cuba com blocos de gelo de 1 cm <sup>3</sup>

Fonte: Autor

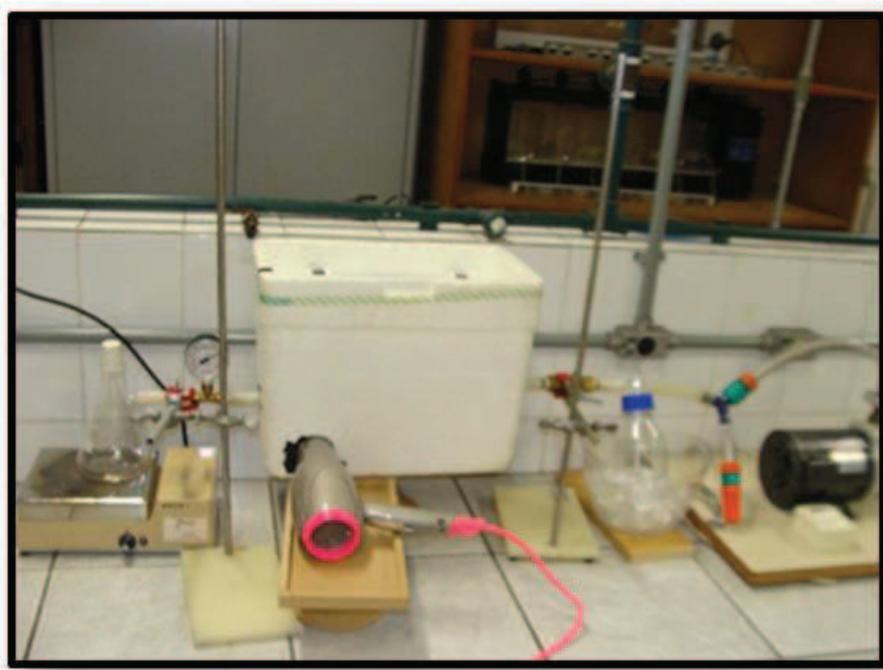
Também foram utilizados os equipamentos e dispositivos da relação que segue:

- Caixa térmica de isopor de 10 litros, com tampa e orifícios laterais, para acondicionar a Câmara 2 em seu interior;
- Tolueno 99,5 % vol. Marca DINÂMICA QUÍMICA;
- Água destilada e deionizada;
- Termohigrômetro portátil INSTRUTHERM para medir temperatura e UR do ar do ambiente do Laboratório de Saneamento e dos vapores d'água e de tolueno dentro da Câmara 1;
- Formas de gelo de plástico;
- Proveta com escala de 0-10 mL, de vidro;
- Proveta com escala de 0-200 mL, de vidro;
- Pipetador de borracha;
- Dessecador PIREX 250 mm, com tampa e corpo cilíndrico de vidro e sílica gel;
- Cronômetro com leitura digital em horas, minutos e segundos;
- Manômetro GASSMETAL, escala 0 a 760 mmHg (pressão de sucção);
- Recipiente de vidro de 250 mL, com tampa para armazenar a mistura de condensados;
- Estufa elétrica QUIMIS, modelo DG-50, 0-200 °C;
- Hastes com vareta metálica e base retangular de polipropileno;
- Grampos para fixação de válvula e manômetro;
- Secador GAMA 2200 W/110 V – Lumina *Technology* com fluxo de ar quente com regulagens de vazão e de temperatura;
- Gancho pegador metálico;
- Termômetro infravermelho manual MINIPA, modelo MT-320A;
- Cabos elétricos, extensões e plugues compatíveis com a corrente/tensão de trabalho dos aparelhos elétricos.

### 3.3 PROCEDIMENTO

O arranjo experimental ilustrado na Figura 15, foi constituído para a realização de ciclos de ensaios com as fases de adsorção e dessorção para cada filtro químico selecionado.

Figura 15: Arranjo experimental preparado para os ensaios de adsorção e dessorção



Fonte: Autor

Após esses dois ensaios, para se eliminar o resíduo do VOC no GAC, bem como da eventual umidade residual adsorvida no processo de dessorção, fez-se necessário realizar a secagem em estufa. Pela ação do calor do ar aquecido obteve-se a evaporação da água e do solvente residuais que ficaram retidos nas superfícies dos poros dos GACs contidos nos filtros químicos, completando o ciclo de ensaios de regeneração, com três fases distintas: adsorção, dessorção e secagem. Este ciclo de ensaio de regeneração foi repetido por quatro vezes para cada filtro químico, a fim de se obter dados estatísticos que pudessem atestar a sua confiabilidade através da criação do índice de regeneração (IR), assim possibilitando nova ativação dos GACs, com a eficiência de adsorção semelhante ao novo.

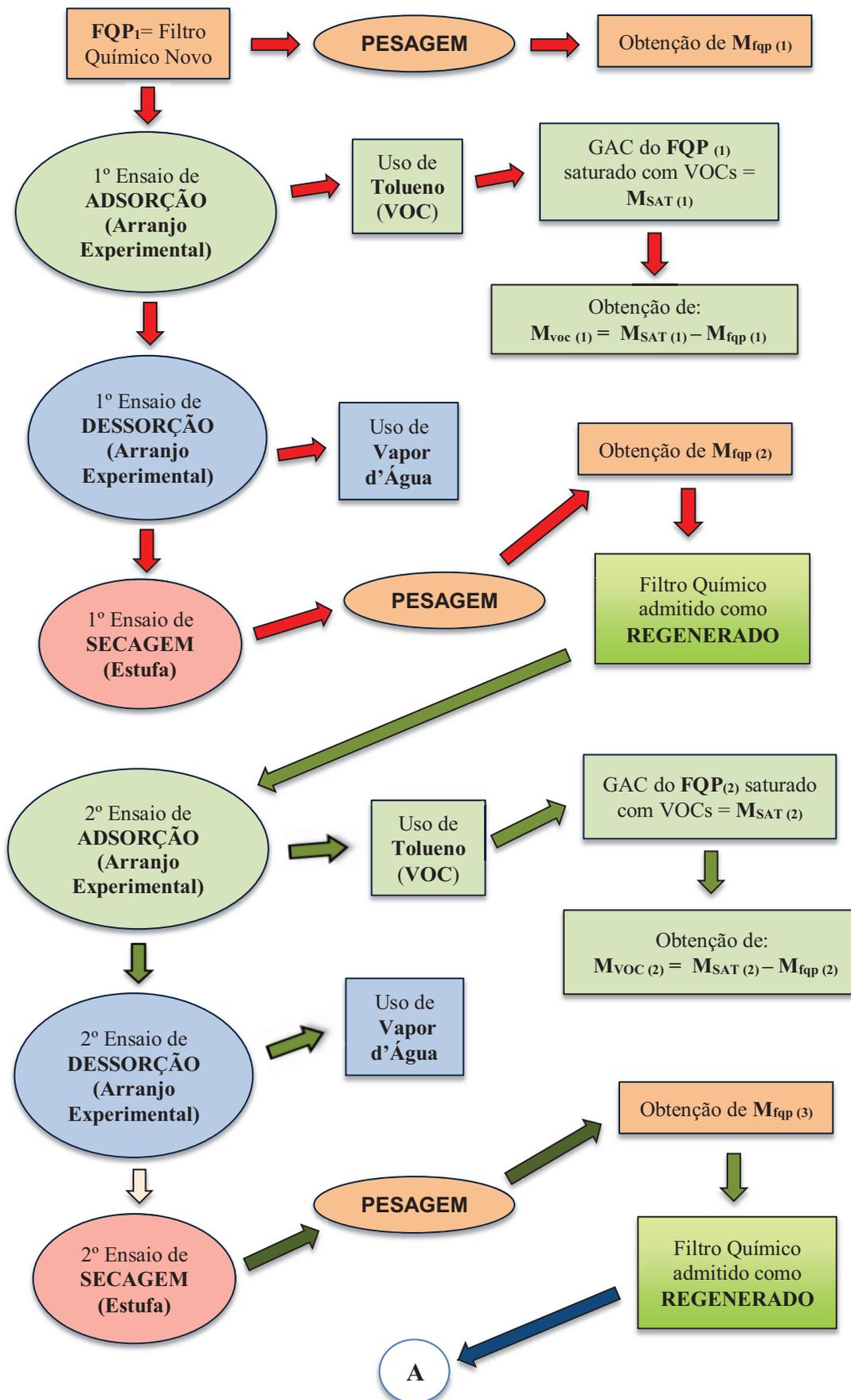
Para comprovar que os GACs dos filtros químicos pudessem ser regenerados, procedeu-se a eliminação de VOCs e umidade, a fim de que após o processo de regeneração, os GACs ficassem isentos de moléculas de adsorbatos e assim possibilitando nova ativação dos GACs com a mesma eficiência de quando eram novos, para serem reutilizados.

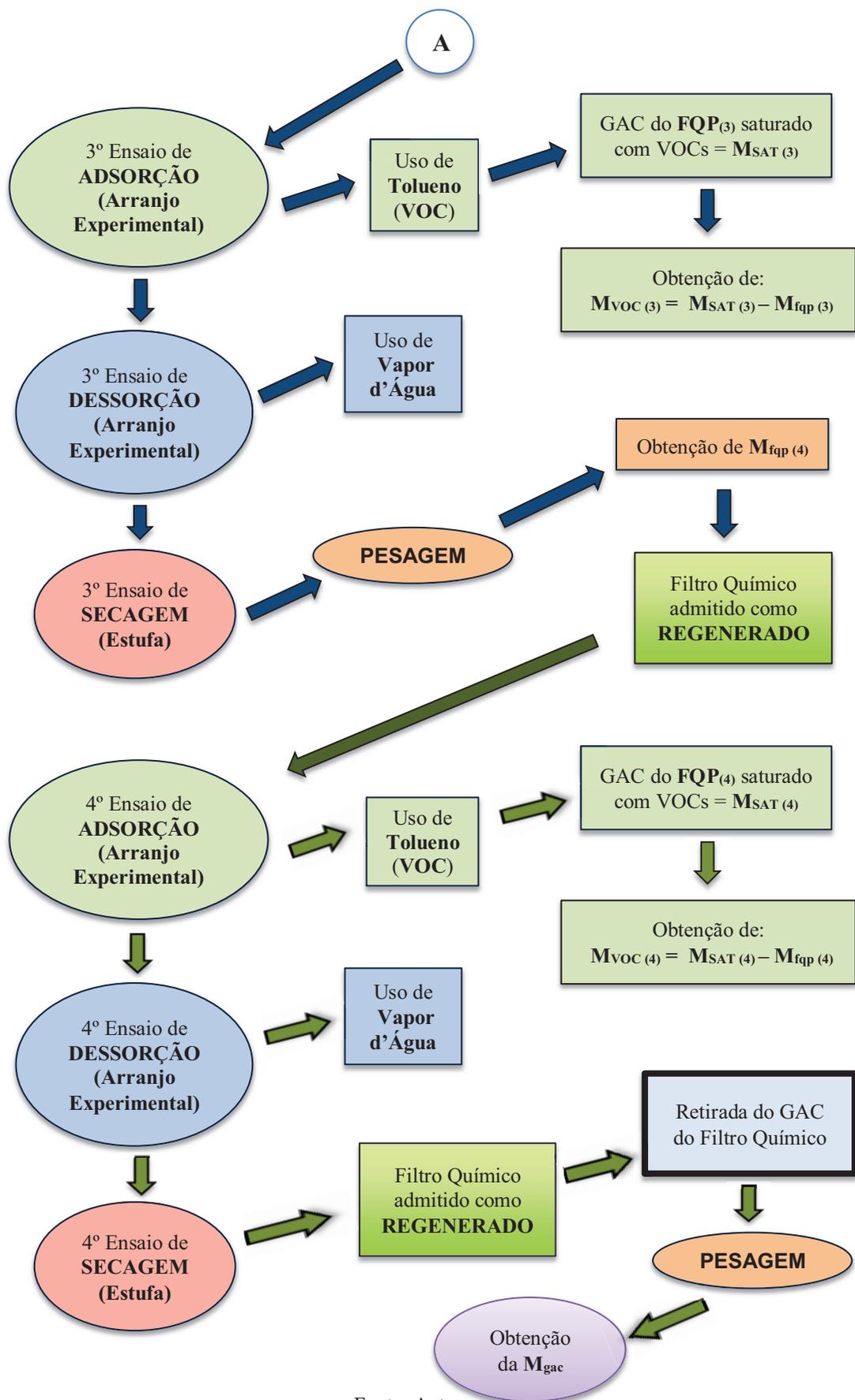
Os ensaios foram assim conduzidos:

- Ensaio de adsorção de VOCs (tolueno) pelos GACs do filtro químico, até a sua adsorção por completo denominada de saturação ou *breakthrough time*, ponto observado visualmente pelo surgimento das primeiras gotículas condensadas no frasco coletor tipo DRECHSEL (item 13, da Figura 14), para obtenção da massa solvente que saturou o filtro químico, denominada  $M_{SAT}$ ;
- Ensaio de dessorção com uso de vapor d'água aquecida até a saturação dos GACs e arraste parcial dos vapores de tolueno que estavam retidos nos GACs do filtro químico. Este ponto foi observado visualmente pelo surgimento de gotículas condensadas no frasco coletor tipo DRECHSEL;
- Ensaio de secagem, submetendo o filtro químico ao calor do ar aquecido em estufa, a temperatura de 150 °C por 12 horas, mantendo o filtro a temperatura superior à de evaporação da água e do tolueno que estavam retidos nos GACs, chamados de resíduos da fase de dessorção. Após essa fase de secagem, o filtro químico foi admitido como preparado (FQP) para o próximo ciclo de ensaios.

A Figura 16 ilustra o fluxograma dos quatro ciclos de ensaios de regeneração, o qual cada filtro químico foi submetido.

Figura 16: Fluxograma dos quatro ciclos de ensaios de regeneração





Fonte: Autor

O filtro químico novo foi denominado preparado (FQP) e após submetido ao primeiro ciclo de ensaio de regeneração, voltou a condição inicial de FQP, para o uso e admitido como regenerado. Assim, repetindo-se o ensaio de regeneração por quatro vezes. A massa nesta condição de FQP, foi denominada de massa de filtro químico preparado ( $M_{fqp}$ ).

Os valores de  $M_{fqp}$  obtidos em cada um dos quatro ciclos de ensaios de regeneração foram utilizados para o cálculo do índice de regeneração (IR), admitido como o indicador para comprovar ou não a sua regeneração.

Para o cálculo do coeficiente adsorativo (Ca), foram utilizados os valores de massa de tolueno adsorvido pelo GAC ( $M_{voc}$ ) e os valores da massa do GAC ( $M_{gac}$ ). Sendo que os valores de  $M_{gac}$  de cada um dos cinco filtros químicos foram obtidos após a retirada do GAC dos filtros químicos, por processo mecânico (uso de serra fita). Depois, a  $M_{gac}$  foi colocada em recipiente para ser submetido a pesagem (Figura 17). Esta pesagem ocorreu após a realização do quarto ciclo de ensaios de regeneração, que cada filtro foi submetido.

Figura 17: Pesagem do GAC ( $M_{gac(2)}$ ), retirado do filtro químico n° 2



Fonte: Autor

Os valores de massas  $M_{fqp}$ ,  $M_{voc}$  e  $M_{gac}$  foram utilizados como variáveis para determinar a regeneração e a capacidade adsorativa do filtro químico, sendo que, comprovada a eficiência da regeneração do filtro químico, admitir-se-á que o mesmo poderá retornar aos usuários de EPRs tipo SF (do mesmo fabricante).

Com os valores de  $M_{VOC}$  obtidos nos ensaios de adsorção de cada ciclo de regeneração e da  $M_{gac}$  obtida após o quarto ensaio de secagem, obteve-se o valor médio do coeficiente adsortivo ( $C_{am}$ ).

### 3.3.1 Ensaio de Adsorção

Os ciclos de ensaios de regeneração foram realizados entre os meses de maio a outubro de 2018 e a atmosfera dos Laboratórios esteve sob a pressão atmosférica aproximada de 700 mmHg, temperatura variando de 17 a 24 °C e UR variando de 45 a 65 %.

Com o objetivo de se atingir o *breakthrough time* do filtro químico, foi desenvolvido no arranjo experimental um circuito com geração de um fluxo constante de 60 L.min<sup>-1</sup>, constituído da mistura de ar atmosférico com o vapor de tolueno. Após a observação da formação de gotículas do condensado do VOC (tolueno) no copo de vidro do coletor tipo Drechsel (item 13 da Figura 14), encerrou-se o ensaio de adsorção, definindo-se o intervalo de tempo da saturação ou *breakthrough time* de acordo com Banalary et al. (2015).

Foram realizados, os seguintes procedimentos:

- Pesagem do filtro novo, com a retirada da sua embalagem original e demarcado com numeração de 1 a 5;
- Instalação do filtro químico novo no dispositivo metálico, denominado de Câmara 2, conforme ilustra a Figura 18;

Figura 18: Filtro químico sendo inserido no dispositivo metálico (Câmara 2)



Fonte: Autor

- Pipetagem de 100 mL do tolueno de sua embalagem original (Figura 11), no kitassato de 500 mL (item 02 da Figura 14), denominado de Câmara 1;
- Instalação da Câmara 2 dentro da caixa de isopor, conforme ilustra a Figura 19, sendo que em seguida, encaixe das mangueiras, válvulas, manômetro que ligam a Câmara 1 a Câmara 2;

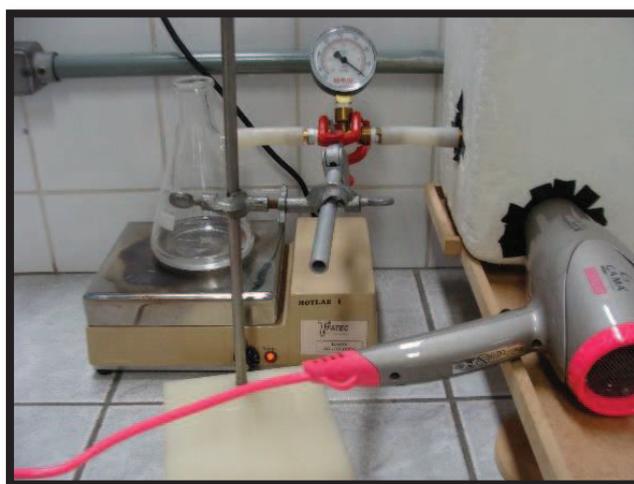
Figura 19: Dispositivo metálico (Câmara 2) instalada dentro da caixa de isopor



Fonte: Autor

- Acionamento dos aquecedores elétricos: da Câmara 1 e da Câmara 2, conforme ilustra a Figura 20.

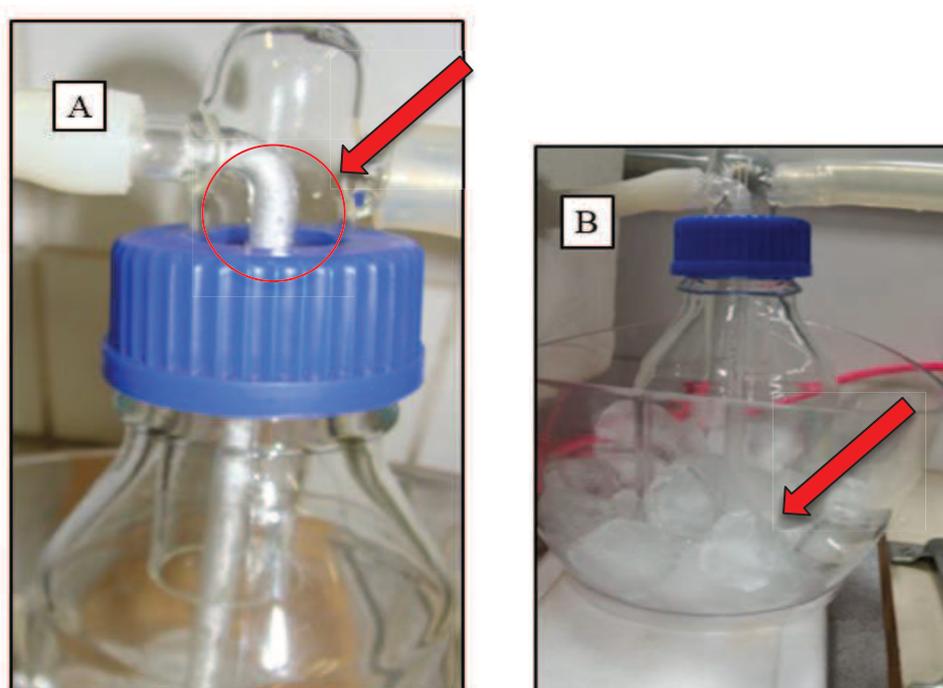
Figura 20: Uso de aquecedores para as Câmaras 1 e 2



Fonte: Autor

- Instalação do frasco coletor tipo DRECHSEL, envolto em cuba com pedras de gelo (Figura 21-B), para reduzir a temperatura do vapor do tolueno que saturou os GACs e, portanto, passou pela Câmara 2 do circuito em direção ao coletor, onde se condensa e é recolhido. Esta avaliação subjetiva do surgimento das primeiras gotas do solvente condensado, foi importante para revelar que houve a passagem de VOC por todas as camadas do GAC do filtro químico, confirmando a sua adsorção por completo, isto é sua saturação, conforme ilustra a Figura 21-A.

Figura 21: Observação de gotículas de tolueno refletidas no tubo curvo do coletor DRECHSEL (A) e cuba de gelo (B)



Fonte: Autor

- Conexão das mangueiras do frasco coletor a Câmara 2 e a bomba de vácuo (Item 16 da Figura 14).

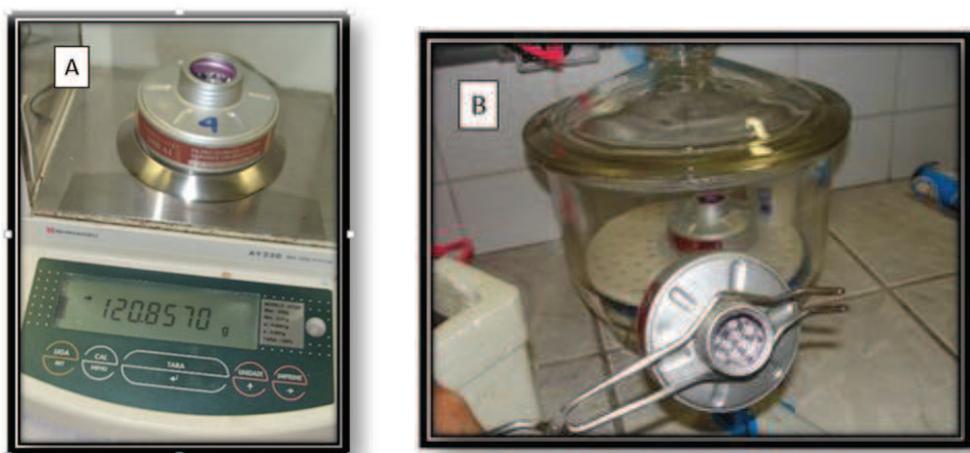
O solvente tolueno (100 mL) vertido na Câmara 1, foi aquecido na temperatura constante de 120 °C, com o auxílio da chapa de aquecimento elétrica e sob pressão atmosférica. Simultaneamente acionou-se o aquecedor da Câmara 2, instalado dentro da caixa de isopor, utilizada para a conservação da temperatura interna em 80 °C. Após esta montagem, acionou-se a bomba de vácuo para a geração de um fluxo de 60 L.m<sup>-1</sup> da mistura de ar e vapor de VOCs no circuito do arranjo experimental. Essa mistura gasosa com VOC proveniente da Câmara 1, seguiu o circuito do arranjo experimental em direção ao filtro químico, previamente inserido na

Câmara 2, até que houvesse a saturação do mesmo (*breakthrough time*). Este fenômeno foi observado com o surgimento das primeiras gotículas, visíveis no tubo de vidro interno do coletor tipo DRECHSEL (item 13 da Figura 14 e Figura 21-A).

Nesse instante, a válvula de saída da Câmara 2, foi fechada e a bomba de vácuo desligada, evitando-se o retorno dos condensados que estavam na base do copo de vidro do coletor DRECHSEL a esta Câmara 2.

Uma vez saturado o carvão do filtro químico, iniciou-se o procedimento de pesagem do filtro para a obtenção da massa de VOCs ( $M_{voc}$ ) adsorvida pelos GACs. Posteriormente, o filtro químico saturado foi retirado da Câmara 2 e transportado, com o uso de pinça metálica, visto que estava aquecido com ar quente do secador, para o interior do dessecador (Figura 22-B) para que houvesse o seu resfriamento até o equilíbrio com a temperatura do laboratório, alcançando a estabilidade térmica, para que em seguida pudesse ser efetuada a sua pesagem sem que houvesse a evaporação do tolueno adsorvido (Figura 22-A).

Figura 22: Pesagem do filtro químico (A) após o uso do dessecador (B)



Fonte: Autor

### 3.3.2 Ensaio de dessorção

Para que o filtro químico fosse ativado novamente, ou seja, para que o VOC adsorvido no GAC fosse removido e, portanto, o carvão se tornasse regenerado, o mesmo arranjo experimental foi preparado, substituindo-se o tolueno por água destilada aquecida a temperatura de 120 °C, sob pressão atmosférica e submetida ao mesmo fluxo de 60 L.min<sup>-1</sup>.

A mistura de vapor d'água e ar passou da Câmara 1 em direção a Câmara 2 (filtro químico) até a observação visual do surgimento de gotículas condensadas no coletor (Figura 23), indicando que houve a passagem da mistura de condensados: água e solvente.

Para que houvesse a máximo dessorção do tolueno adsorvido no GAC do filtro químico, o ensaio foi realizado por 30 minutos, O objetivo deste procedimento de dessorção foi a completa remoção do solvente, pelo arraste com vapor d' água.

Figura 23: Formação de gotículas de condensados durante o ensaio de dessorção



Fonte: Autor

Para se confirmar se os condensados retidos eram constituídos respectivamente de tolueno e água, conforme observação visual, foram coletadas amostras de condensados recolhidos após o ensaio de dessorção, as quais foram armazenadas em *freezer* a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Estas amostras foram analisadas por Cromatografia gasosa, seguida de espectrometria de massa (CG-MS) no Laboratório ALS, especializado em análises de Higiene Ocupacional (HO) (ANEXO A).

### 3.3.3 Secagem do filtro químico

Para a secagem de condensados de água e tolueno residuais que se encontravam nos filtros químicos, após os ensaios de dessorção, os mesmos foram colocados em estufa na temperatura de 150 °C (Figura 24), temperatura esta, acima da temperatura de ebulição do tolueno (110,6 °C na pressão de 760 mmHg) conforme propriedades físico-químicas encontradas na FISPQ do tolueno (ABNT, 2009b; DINÂMICA QUÍMICA, 2018).

Figura 24: Ensaio de secagem do filtro químico, na estufa elétrica



Fonte: Autor

Após doze horas na estufa, os filtros químicos foram retirados e pesados para a obtenção da sua massa, agora denominado de filtro químico preparado ( $M_{fqp}$ ) e considerado regenerado. Cada filtro foi submetido ao ciclo de regeneração por quatro vezes.

Em cada ciclo, o filtro químico foi pesado em balança analítica (Figura 25) após o ensaio de adsorção de vapores do tolueno ( $M_{SAT}$ ) e após a secagem ( $M_{fpq}$ ) para obtenção da  $M_{VOC}$ .

Figura 25: Pesagem do filtro químico preparado (FQP), após o ensaio de secagem



Fonte: Autor

Para se evitar a contaminação da atmosfera do laboratório com VOCs e o descarte inadequado do solvente líquido, a mistura de condensados foi precipitada no interior do coletor e posteriormente transferida para uma proveta com tampa e realizado o transbordo para um recipiente de maior volume (também hermético) para posterior reuso, atendendo a proposta de sustentabilidade.

#### 3.3.4 Análise por CG-MS

Com a finalidade de se comprovar o ponto final do processo de adsorção e/ou dessorção realizado no arranjo experimental, foram coletadas amostras de condensados para a análise cromatográfica por cromatógrafo a gás com detector de massa acoplado (GC-MS) (APÊNDICE D).

As amostras foram constituídas de:

- Amostra 1: a primeira amostra foi obtida a partir do tolueno puro utilizado no processo de adsorção;
- Amostra 2: foi obtida do destilado resultante do ensaio de adsorção com tolueno. Após o tempo de saturação do filtro, que foi em média de  $5,5 \pm 0,5$  min. (Apêndice A), coletou-se a primeira fração do condensado no frasco coletor.
- Amostra 3: foi obtida do destilado resultado do ensaio de dessorção com o uso de vapor d'água por 30 minutos. Desprezou-se os condensados obtidos e fez-se novamente o ensaio de dessorção para a coleta dos condensados da mistura posterior, com o arranjo experimental funcionando por 10 minutos.

A análise cromatográfica foi realizada em laboratório externo contratado, o Laboratório ALS, multinacional do grupo CorpLab, especializado em análises de Higiene Ocupacional (HO). Os relatórios completos das análises químicas foram inseridos no Anexo A, itens: A1, A2 e A3.

A amostra de tolueno em concentração de  $18.360 \mu\text{g.L}^{-1}$ , que foi obtida na coleta de amostras de condensados, ou seja, da mistura de água e tolueno residual, que correspondeu a 17,4 % da concentração da amostra de tolueno recolhida na segunda coleta de amostras que saturou o filtro químico no ensaio de adsorção, onde foi obtida a concentração de tolueno no valor de  $105.600 \mu\text{g.L}^{-1}$ , admitida como 100%.

Este resultado revelou, que após o ensaio de dessorção no arranjo experimental, foi constatado a presença de tolueno residual no filtro químico, o que exigiu a inclusão da etapa de secagem do filtro químico em estufa por um período prolongado, que foi incluso no ciclo de ensaio de regeneração, para aumentar a ativação dos GACs do filtro químico dessorvido, ou seja, para se eliminar todo o resíduo de tolueno.

### 3.3.5 Teste “t” Student

Foi utilizado para comparação estatística da média das amostras obtidas de Mvoc, IR e Ca, o teste “t” de Student, admitindo-se como intervalo de confiança de 95% ( $p < 0,5$ ) para obtenção de gráficos, que foram elaborados no programa Prisma 5.0.

Na distribuição  $t$  de Student, valores muito baixos ou muito altos tem menor probabilidade de ocorrer, indicando que é menos provável que a média de uma amostra apresente valores muito distantes da média da população. O teste “ $t$ ” foi utilizado a partir da hipótese nula, ou seja, não ser possível a regeneração de GAC de filtro químico e consequentemente a hipótese positiva. Calcular o valor de  $t$  conforme a fórmula do programa Prisma 5.0. Se a probabilidade do resultado ocorrido for muito pequena, pode-se concluir que o resultado observado é estatisticamente relevante. Essa probabilidade também é chamada de  $p$ -valor ou valor  $p$  (DEVORE, 2011).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Segundo a ABRELPE (2016), aproximadamente 41,6% do total de 78,3 milhões de toneladas de resíduos sólidos gerados anualmente no Brasil, têm destinação inadequada, ou seja, são descartados em lixões ou aterros controlados que não têm a estrutura necessária para evitar contaminação, o que resulta em impactos negativos ao meio ambiente. Este problema constitui um risco à saúde pública, pois é responsável pela contaminação de solo e água.

De acordo com a Associação Nacional da Indústria de Material de Segurança e Proteção ao Trabalho (ANIMASEG), no ano de 2017 foram comercializados pelas empresas associadas a esta entidade, 320.000 respiradores semifaciais (SF) e 3.000.000 de filtros químicos contendo GAC com alta capacidade de adsorção de compostos orgânicos voláteis (VOCs), como os vapores de tolueno empregado nas atividades de pintura industrial. Considerando que cada filtro químico possui aproximadamente 90 g de GAC, houve em 2017 um descarte aproximado de 270 t de GAC saturados com VOCs, em Aterros Sanitários Classe I ou incineradores e possivelmente, uma parte deste total, em lixões sem controle ambiental, decorrente do fato de que nem todos os usuários de EPRs trabalham de acordo com as normas ambientais vigentes (GOUVEIA, 2015).

O GAC contido nos filtros químicos do respirador SF é um material de alta capacidade adsorptiva de VOCs. Nas atividades de pintura industrial, o emprego do carvão ativado no EPR destina-se a adsorção dos vapores de VOCs presentes no ambiente de trabalho, com o objetivo de proteger o trabalhador exposto a concentrações tóxicas destes compostos (TORLONI; VIEIRA, 2003).

Quanto à sua destinação final, as empresas produtoras, como a *Air Safety* por exemplo, recomendam aos seus clientes o atendimento da norma que determina que, após a saturação dos filtros químicos, os mesmos devem ser devidamente substituídos e os filtros saturados deverão ser armazenados em local apropriado para posterior descarte adequado, segundo as orientações contidas na PNRS (COSTA, 2013). Como estão contaminados com solventes orgânicos, pela resolução nº 313 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002), serão destinados a Aterros Sanitários Classe I ou incinerados. Este procedimento para destinação correta destes resíduos envolve custos adicionais ao usuário (empresa), pois este processo não está incluído na coleta pública.

A possibilidade dos filtros químicos saturados por solvente, como por exemplo o tolueno, serem descontaminados, ofereceria oportunidade de desenvolvimento de empresas

recicladoras que utilizassem o método de regeneração aqui proposto, incentivando a prática da logística reversa e consequente adequação à PNRS (BRASIL, 2018), pois com o retorno do material usado para o processo produtivo, possivelmente proporcionar-se-á menor utilização de recursos naturais, como o carvão ativado importado, alumínio e polietileno usados na fabricação dos filtros químicos como os que foram testados no arranjo experimental, onde foram submetidos ao ciclo de ensaios de regeneração. O presente modelo se presta como uma contribuição, sendo uma ferramenta para o manejo sustentável destes insumos.

Soluções de regeneração de filtros químicos utilizados em respirador SF como a proposta deste trabalho, poderão ser adotadas pelos fabricantes de EPRs em busca de um novo processo sustentável na gestão de resíduos sólidos.

A partir dos ciclos de ensaios realizados para a regeneração do filtro químico de respiradores tipo peça SF, foi possível determinar um indicador da viabilidade de regeneração, aqui denominado de índice de regeneração (IR). O IR médio, foi determinado a partir dos resultados obtidos com a amostra constituída de cinco filtros químicos ensaiados.

Este IR sugerido destinou-se a determinar se o filtro químico está apto a ser submetido ao ciclo de ensaios de regeneração, ou seja, se o GAC contido nos cartuchos está isento de resíduos de VOCs e, deste modo, serem considerados ativados novamente, podendo ser disponibilizados aos usuários do mesmo EPR regenerado.

Para a obtenção do IR, foram considerados os filtros químicos novos e regenerados, aqui denominado de filtro químico preparado (FQP), pois sofreu dessorção e secagem, que corresponde àquele novo, sem uso, após ter sido submetido a cada ensaio do ciclo de regeneração. Foram medidas as massas dos filtros químicos preparados ( $M_{fqp}$ ) anteriormente a realização dos ciclos de ensaios, denominado filtro químico novo e posteriormente a adsorção de tolueno de cada um deles (total de quatro repetições dos ensaios de regeneração). Nas condições do ensaio, a concentração do solvente tolueno no ambiente foi calculada em 8.041 ppm, no fluxo de 60 L.min<sup>-1</sup> (APÊNDICE A).

Primeiramente obteve-se o tempo de saturação ou *breakthrough time*, cuja média corresponde ao tempo necessário para que ocorra a saturação total do GAC, nas condições do ensaio aqui descritas. O tempo médio registrado foi (5,5 ± 0,2) min (n=5 filtros químicos). O valor do tempo médio foi utilizado para o cálculo da concentração de tolueno ( $C_{tolueno}$ ) no ambiente, o qual o filtro químico foi submetido nos ensaios de saturação (APÊNDICE A).

A massa do solvente, definida como ( $M_{VOC}$ ), foi determinada pela diferença entre a massa do FQP saturado com tolueno ( $M_{SAT}$ ) e o mesmo após dessorção e secagem, admitido novamente como filtro químico preparado ( $M_{fqp}$ ), conforme a Equação 2.

$$M_{VOC(i)} = M_{SAT(i)} - M_{fqp(i)} \quad [g] \quad (2)$$

Onde:

- $M_{VOC}$  = massa de VOC adsorvida no GAC do filtro químico ensaiado [g]
- $M_{SAT}$  = massa do filtro químico saturado, após ensaio de adsorção [g]
- $M_{fqp}$  = massa do filtro químico preparado, após ensaio de secagem [g]
- $i$  = ciclo de ensaios (de 1 a 4)

Foram convencionadas as massas de cada um dos cinco filtros químicos de acordo com o ensaio realizado, conforme segue:

- $M_{fqp(1)}$  = massa do filtro químico preparado quando novo (amostra do fabricante);
- $M_{SAT(1)}$  = massa do filtro químico preparado quando novo, após saturado com VOC, submetido ao 1º ensaio de adsorção;
- $M_{fqp(2)}$  = massa do filtro químico novo após o 1º ciclo de regeneração (ensaio de secagem em estufa);
- $M_{SAT(2)}$  = massa do filtro químico regenerado, após saturado com VOC, submetido ao 2º ensaio de adsorção;
- $M_{fqp(3)}$  = massa do filtro químico novo após o 2º ciclo de regeneração (ensaio de secagem em estufa);
- $M_{SAT(3)}$  = massa do filtro químico regenerado, após saturado com VOC, submetido ao 3º ensaio de adsorção;
- $M_{fqp(4)}$  = massa do filtro químico novo após o 3º ciclo de regeneração (ensaio de secagem em estufa);
- $M_{SAT(4)}$  = massa do filtro químico regenerado, após saturado com VOC, submetido ao 4º ensaio de adsorção.

Os valores coletados das massas de carvão ativado ( $M_{gac}$ ), massas de VOCs adsorvidos ( $M_{VOC}$ ) e massas do filtro químico preparado ( $M_{fqp}$ ) são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2: Valores obtidos de  $M_{fqp}$ ,  $M_{SAT}$  e  $M_{VOC}$  dos filtros químicos

$M_{VOC}$ (g)	Filtro químico 1	Filtro químico 2	Filtro químico 3	Filtro químico 4	Filtro químico 5	Média	Desvio Padrão
$M_{fqp(1)}$	127,1929	127,7373	129,8651	129,8574	128,7895	127,99	1,13
$M_{SAT(1)}$	136,4279	136,8301	139,1988	139,1385	138,0070	137,21	1,12
$M_{VOC1}$	9,2350	9,0928	9,3337	9,2811	9,2175	9,22	0,01
$M_{fqp(2)}$	124,7616	125,3940	125,5470	125,2175	125,3221	125,04	0,39
$M_{SAT(2)}$	134,7289	135,8301	136,4014	135,9304	135,7350	135,23	0,71
$M_{VOC(2)}$	9,9673	10,4361	10,8544	10,7129	10,4129	10,19	0,31
$M_{fqp(3)}$	119,1087	120,8625	120,9173	120,4903	120,4512	119,78	0,94
$M_{SAT(3)}$	129,1765	131,0226	131,1787	130,6765	130,5391	129,85	0,96
$M_{VOC(3)}$	10,0678	10,1601	10,2614	10,1862	10,0879	10,07	0,01
$M_{fqp(4)}$	119,0329	120,7943	120,8993	120,6214	120,7806	119,91	1,23
$M_{SAT(4)}$	129,0758	131,2546	131,1590	131,0504	131,1414	130,11	1,46
$M_{VOC(4)}$	10,0429	10,4603	10,2597	10,4290	10,3608	10,20	0,22

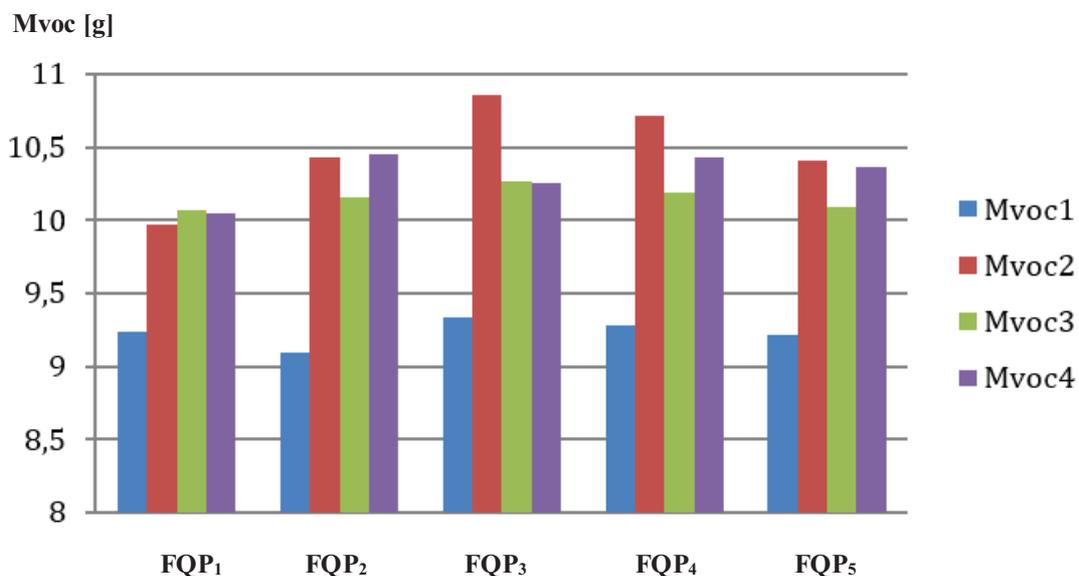
Onde:

$M_{fqp}$  = massa do filtro químico preparado [g];  
 $M_{SAT}$  = massa do filtro saturado com tolueno[g];  
 $M_{voc}$  = massa do tolueno [g].

Fonte: Autor

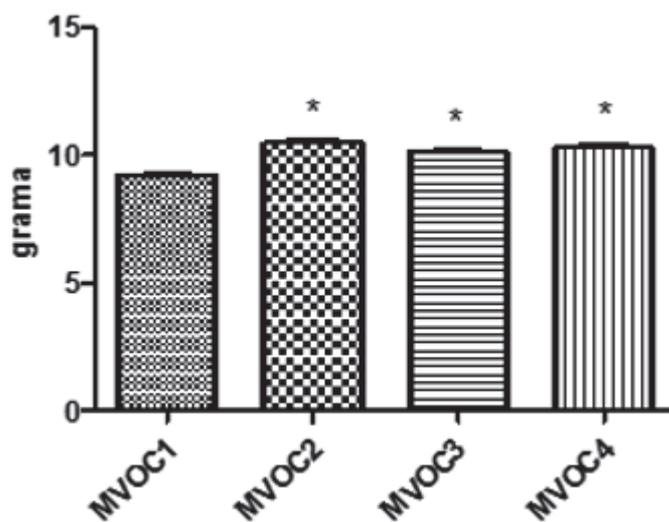
Estes valores das massas, são as variáveis que serão utilizadas nas Equações 5 e 6 que foram desenvolvidas para a realização dos cálculos do índice de regeneração (IR) e do coeficiente adsorptivo (Ca), que serão demonstrados adiante.

Observa-se pelo gráfico da Figura 26, que a massa de tolueno que ficou retida no GAC do filtro químico novo após o primeiro ensaio de adsorção ( $M_{VOC1}$ ), apresentou valor inferior à massa de tolueno que ficou retida no GAC do mesmo filtro químico submetido ao segundo ciclo de ensaio de regeneração ( $M_{VOC2}$ ).

Figura 26: Massa de VOC ( $M_{VOC}$ ) retida nos filtros químicos ensaiados

Fonte: Autor

Observa-se ainda que este incremento na capacidade de adsorção após regeneração não se modifica nos ciclos subsequentes, onde as  $M_{VOC}$  dos ciclos 2, 3 e 4 diferenciam da  $M_{VOC}$  inicial, mas não diferem entre si (Figura 27).

Figura 27. Média da massa de VOC ( $M_{voc}$ ) adsorvida.

\*  $p < 0,05$ , teste "t" de Student; os valores  $M_{voc2}$ ,  $M_{voc3}$  e  $M_{voc4}$  não diferenciam entre si

Fonte: Autor

Este resultado é indicativo de que muito provavelmente o GAC importado pode ter absorvido alguma umidade durante o seu transporte e/ou processo de fabricação, de modo que estas moléculas de água ocuparam uma pequena porcentagem de seus micro e mesoporos, reduzindo a sua capacidade de adsorção de VOC. Nossa constatação, portanto, reforça a viabilidade e a validade de se proceder a regeneração destes filtros químicos utilizados em EPRs e também demonstra que este ganho na capacidade de adsorção de VOC se mantém inalterado nos ciclos subsequentes de regeneração, pelo menos dentro destas repetições.

Para se comprovar a necessidade de se acrescentar a fase de secagem no ciclo de ensaios de regeneração, foram coletadas amostras de tolueno condensada no ensaio de adsorção para servir de padrão e da mistura de água e tolueno condensada no ensaio de dessorção, que foram submetidas a análise cromatográfica por cromatógrafo a gás com detector de massa acoplado, modelo GC-MS (APÊNDICE D).

A análise cromatográfica foi realizada em laboratório externo, certificado (Laboratório ALS, multinacional do grupo CorpLab, especializado em análises de Higiene Ocupacional). Foram recolhidas três amostras, sendo que a amostra 1 correspondeu ao tolueno puro utilizado para adsorção; a amostra 2 correspondeu ao condensado obtido após a adsorção e a amostra 3 correspondeu ao condensado obtido após a dessorção.

Os relatórios completos das análises químicas estão no Anexo A em seus itens: A1, A2 e A3 e os resultados obtidos mostram as concentrações de tolueno, estão apresentados na Tabela 3:

Tabela 3: Concentrações de tolueno ( $C_{\text{tolueno}}$ )

(nº) AMOSTRA	$C_{\text{tolueno}}$ ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ )
(1) Tolueno PA	359.900.000
(2) Condensado Adsorção	105.600
(3) Condensado Dessorção	18.360

Fonte: Autor

O valor de concentração de tolueno, da amostra colhida do ensaio de dessorção foi de  $18.360 \mu\text{g.L}^{-1}$ , o que corresponde a 17,4 % da concentração da amostra de tolueno recolhida do ensaio de adsorção, onde foi obtida a concentração de tolueno no valor de  $105.600 \mu\text{g.L}^{-1}$ . Estes valores correspondem a análise qualitativa realizada em cada ensaio. Admitiu-se visualmente

que nestas amostras, havia somente tolueno (amostra 2) ou somente água (amostra 3), correspondente à completa adsorção do solvente pela água (amostra 3) e a completa saturação do GAC pelo tolueno (amostra 2).

Este resultado revelou a presença de resíduos de tolueno no filtro químico após o ensaio de dessorção com vapor d'água, mesmo após 30 minutos de aplicação do vapor d'água em fluxo constante. Desta forma, os GACs não ficaram 100 % isentos de tolueno e assim não poderiam ser considerados totalmente regenerados.

O vapor d'água como veículo de arraste do adsorbato do GAC é referenciado na literatura como sendo um agente eficiente (HORI et al., 2010) e, por esta razão, foi adotado neste estudo. Entretanto, os resultados discutidos acima, apontam para a necessidade de um procedimento adicional no protocolo de regeneração a fim de se obter uma regeneração completa e eficiente.

Para a ativação “ou limpeza” dos microporos, mesoporos e poros e superfície dos GACs do filtro químico saturado, fez-se necessário a inclusão do ensaio de secagem em estufa, onde os filtros químicos após o ensaio de dessorção, foram inseridos na temperatura constante de 150 °C pelo período de 12 horas.

Como a temperatura de ebulição da água é de 100 °C e do tolueno é de 110,6 °C (ambos a pressão de 760 mmHg) (ATTIKINS, 1986), após a secagem, houve a evaporação da mistura de água e resíduos de tolueno que ainda estavam retidos nos GACs após o ensaio de dessorção, atingindo a sua regeneração completa, ou seja, o filtro químico ficou isento de VOCs, denominado aqui de filtro químico preparado (FQP).

Este trabalho, portanto, otimizou o processo de dessorção/regeneração do GAC de EPRs, pela eliminação completa de resíduos dos seus poros por meio de secagem controlada do FQP. Este problema não foi discutido pelos autores consultados durante a realização deste trabalho (NELSON; HARDER, 1974; LI, 2002; WANG et al., 2004; LILO-RÓDENAS et al.; MARSH e RODRIGUEZ-REINOSO, 2006; LINDERS et al., OKAWA et al. e TAI; LEE, 2007; HORNG; TSENG e BRUM et al., 2008; HORI et al., 2010; AMEH et al, 2013; BANALARY et al., 2015 e YING, 2015).

Para o cálculo do IR, utilizou-se a Equação 3 e os resultados do memorial de cálculo (APÊNDICE E) foram inseridos na Tabela 4. Inicialmente, considera-se a massa do filtro químico preparado quando novo ( $M_{fqp(1)}$ ) em relação ao mesmo filtro químico submetido ao segundo ensaio de regeneração ( $M_{fqp(2)}$ ).

Calculou-se o IR através da Equação 3, e admitiu-se que o filtro químico poderá ser regenerado, quando o resultado de IR próximo de 100 %, pois nesta condição, supõe-se que os seus GACs foram ativados novamente através do ensaio de regeneração proposto. Se o valor de IR for superior a 100%, supõe-se que os resíduos de solventes e água ainda permaneceram no GAC do filtro químico e o mesmo não poderá ser considerado regenerado e, portanto, não será reutilizado ou reciclado.

$$IR(i) = 100 - \left( \frac{M_{fqp}(i) - M_{fqp}(i+1)}{M_{fqp}(i)} \right) \quad [\%] \quad (3)$$

Onde:

- IR = Índice de Regeneração do GAC do filtro químico [%]  
 $M_{fqp}$  = massa do filtro químico preparado [g]  
*i* = número de ciclos de ensaios (de 1 a 3)

Tabela 4: Valores da massa do filtro químico preparado ( $M_{fqp}$ )

$M_{fqp}$ (g)	Filtro Químico 1	Filtro Químico 2	Filtro Químico 3	Filtro Químico 4	Filtro Químico 5
$M_{fqp}(1)$	127,1929	127,7373	129,8651	129,8574	128,7895
$M_{fqp}(2)$	124,7616	125,3940	125,5470	125,2175	125,3221
$M_{fqp}(3)$	119,1087	120,8625	120,9173	120,4903	120,4512
$M_{fqp}(4)$	119,0329	120,7943	120,8993	120,6214	120,7806

Fonte: Autor

Utilizando-se os valores de  $M_{fqp}$  da Tabela 4, cujo memorial de cálculo (Apêndice E) foi obtido com a utilização da Equação 3, obteve-se os valores de IR, que foram inseridos na Tabela 5.

Tabela 5: Resultado do cálculo do Índice de Regeneração (IR)

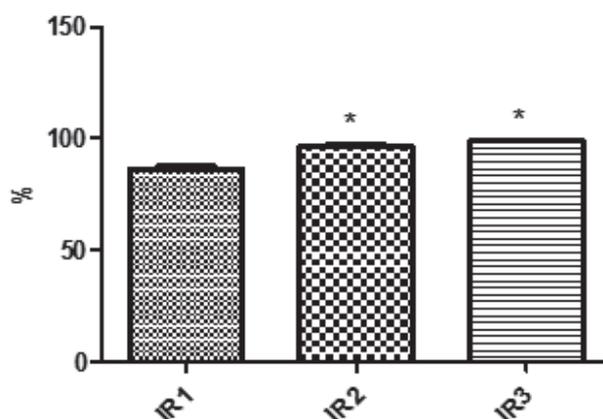
IR	Filtro químico 1 (%)	Filtro químico 2 (%)	Filtro químico 3 (%)	Filtro químico 4 (%)	Filtro químico 5 (%)	Média (%)	Desvio Padrão
IR <sub>1</sub>	99,98	99,98	99,97	99,96	99,97	99,97	0,007
IR <sub>2</sub>	99,95	99,96	99,96	99,96	99,96	99,96	0,003
IR <sub>3</sub>	99,99	99,99	99,99	99,99	99,99	99,99	0,001

Fonte: Autor

Os 15 valores obtidos de IR foram submetidos ao cálculo de média e desvio padrão ( $\bar{x} \pm DP$ ) e coeficiente de variação (CV) que quanto menor for o seu valor, menor será a incerteza em relação ao valor médio.

Do gráfico ilustrado na Figura 28, obteve-se a comparação entre os 03 cálculos de IR realizados.

Figura 28: Índice de Regeneração (IR), conforme comparação entre os ciclos de ensaios realizados



\*  $p < 0,05$ , teste “t” de Student ; os valores de IR2 e IR3 não diferenciam entre si

Fonte: Autor

Os valores calculados com os quinze valores de IR resultaram em média ( $99,97 \pm 0,07$ ) % e  $CV = 7,48$  %. Considera-se um CV inferior a 10% como um resultado satisfatório dentro dos padrões estatísticos, visto que a dispersão em relação a média é reduzido estabelecendo boa reprodutibilidade dos dados obtidos no ensaio proposto (DEVORE, 2011). Também se demonstrou que a regeneração subsequente a IR<sub>1</sub>, ou seja IR<sub>2</sub> e IR<sub>3</sub> foram não diferenciam entre si, o que significa que em relação ao primeiro processo de regeneração do filtro químico novo houve um ganho de eficiência na adsorção de VOCs, porém não houve acréscimo de eficiência nos processos subsequentes de regeneração, o que foi constatado na comparação de Mvoc obtida nos ciclos de regeneração posteriores.

Os resultados obtidos por Hori et al. (2010), no seu modelo experimental de regeneração térmica de filtros químicos, utilizando vapor d’água como fluido dessorvente de GAC, revelou que o tempo de saturação dos mesmos regenerados à baixa UR, ou seja, de 20%, foi menor comparado ao filtro químico novo, provando que a umidade é um fator importante a se considerar no processo de regeneração. Esta observação também ficou evidenciada nos ensaios de dessorção aqui realizados, pois para a obtenção do IR, o filtro químico foi regenerado

com o uso de fluxo de ar com vapor d'água aquecido a 120 °C, mantendo a mistura com valor de UR próximo a 60%.

Na Tabela 4, nota-se que os valores de massa dos filtros químicos preparados ( $M_{fqp}$ ) a cada ensaio de regeneração realizado, foi decrescendo até atingir valores de  $M_{fqp}$  praticamente iguais e, essa constatação, de massas que não se diferenciam entre si, também foi observada nos cálculos dos IRs, que nas regenerações subseqüentes se aproximaram a 100%. Portanto, foi constatado que a cada ensaio de regeneração realizado com o mesmo filtro químico, as massas de resíduos de tolueno e/ou água que permaneceram nos GACs do filtro químico após o ensaio de secagem foram cada vez menores, o que permitiu no ensaio de adsorção seguinte, a obtenção de maiores valores de  $M_{VOC}$ , que foram retidos nos GACs até a saturação do filtro químico.

Outro índice de eficiência estabelecido neste trabalho foi o coeficiente adsorativo ( $Ca$ ), cujos valores indicam a capacidade do GAC em adsorver os vapores de VOCs nos ensaios de adsorção. A Equação 4 foi definida para cálculo deste índice.

$$Ca_{(i)} = \frac{M_{voc(i)}}{M_{gac(i)}} \quad [mg \cdot g^{-1}] \quad (4)$$

Onde:

- $Ca$  = coeficiente adsorativo do GAC do filtro químico [ $mg \cdot g^{-1}$ ]
- $M_{voc}$  = massa de solvente adsorvida no filtro químico [g]
- $M_{GAC}$  = massa do carvão ativado do filtro químico ensaiado [g]
- $i$  = número de ensaios de adsorção (de 1 a 4) para cada filtro químico

Conforme já relatado, a fim de se remover os possíveis resíduos de solvente do interior do GAC, e, por consequência remover também a umidade do mesmo, empregou-se a secagem em estufa após a dessorção. Este procedimento não foi realizado por nenhum dos autores estudados e na nossa interpretação foi o principal fator responsável pelos resultados favoráveis aqui demonstrados.

Todos os valores de  $M_{gac}$  e os valores das  $M_{VOC}$  são mostrados na Tabela 6, que corresponderam aos resultados de cada ciclo de ensaios, o qual cada filtro químico novo foi submetido, sendo o valor  $M_{gac}$  médio resultou em  $(90,48 \pm 0,28)$  g, que está de acordo com a informação do fabricante *Air Safety*.

Tabela 6:  $M_{gac}$  e os quatro valores de  $M_{voc}$  obtidos nos ensaios de regeneração.

<b>M (g)</b>	<b>Filtro químico 1</b>	<b>Filtro químico 2</b>	<b>Filtro químico 3</b>	<b>Filtro químico 4</b>	<b>Filtro químico 5</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio padrão</b>
<b><math>M_{gac}</math></b>	89,9721	90,4828	90,5003	90,4960	89,9891	90,48	0,28
<b><math>M_{voc1}</math></b>	9,2350	9,0928	9,3337	9,2811	9,2175	9,23	0,09
<b><math>M_{voc2}</math></b>	9,9673	10,4361	10,8544	10,7129	10,4129	10,43	0,34
<b><math>M_{voc3}</math></b>	10,0678	10,1601	10,2614	10,1862	10,0879	10,16	0,08
<b><math>M_{voc4}</math></b>	10,0429	10,4503	10,2597	10,4290	10,3608	10,36	0,17

Fonte: Autor

Como se pode observar as massas obtidas no ensaio de saturação ( $M_{voc1}$ ) foram inferiores nos filtros químicos novos (média  $(9,23 \pm 0,09)$  g) comparadas aos filtros químicos regenerados (média  $(10,43 \pm 0,34)$  g), indicando que os filtros regenerados obtiveram maior capacidade de adsorção de VOCs.

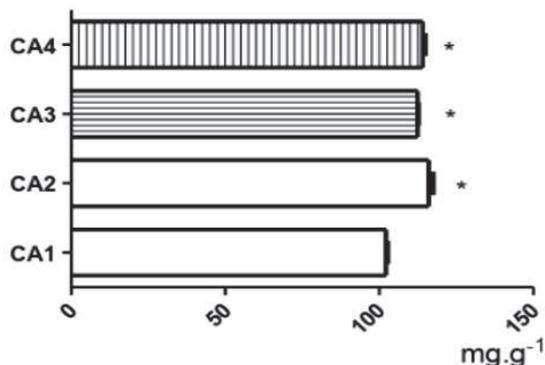
Os vinte resultados do índice Ca, que foram calculados pela Equação 4, para cada um dos cinco filtros químicos regenerados e os resultados foram inseridos na Tabela 7. O gráfico da Figura 29 apresenta a comparação dos valores de Ca médio obtido para cada ciclo de ensaio.

Tabela 7: Resultados do cálculo do Coeficiente Adsorativo (Ca)

<b><math>Ca_{xy}</math> (<math>mg \cdot g^{-1}</math>)</b>	<b>Filtro químico 1</b>	<b>Filtro químico 2</b>	<b>Filtro químico 3</b>	<b>Filtro químico 4</b>	<b>Filtro químico 5</b>
<b><math>Ca_1</math></b>	102,6	100,5	103,1	102,6	102,4
<b><math>Ca_2</math></b>	110,8	115,3	119,9	118,4	115,7
<b><math>Ca_3</math></b>	111,9	112,3	113,4	112,6	112,1
<b><math>Ca_4</math></b>	111,6	115,5	113,4	115,2	115,1

Fonte: Autor

Figura 29: Coeficiente adsortivo (Ca) para cada ensaio de saturação (de 1 a 4)



\*  $p < 0,05$ , teste “t” de Student ; os valores de Ca dos ensaios de saturação n<sup>o</sup>s 2, 3 e 4 não diferenciam entre si.

Fonte: Autor

Constatamos que quanto maior for a  $M_{VOC}$  retida no GAC saturado pelo ensaio de adsorção, maior será o valor do Ca do filtro químico testado.

Lilo-Rodenas et al. (2006), estabeleceram que os carvões ativados de uso comercial conhecidos possuem capacidade adsortiva de vapores de compostos orgânicos aromáticos, como o tolueno, no valor de  $190 \text{ mg.g}^{-1}$ , quando os ensaios foram realizados com a concentração de 200 ppm ao fluxo de  $60 \text{ L.min}^{-1}$ .

Nos ensaios realizados no arranjo experimental deste trabalho, o valor médio obtido para esta capacidade de adsorção foi em média  $Ca_m = (110,2 \pm 0,1) \text{ mg.g}^{-1}$  em alta concentração de vapores de tolueno (8.041 ppm), calculada nas condições experimentais relatadas.

A Tabela 8 mostra os principais itens do método utilizado no arranjo experimental comparado ao que foi encontrado nas pesquisas apresentadas na literatura.

Tabela 8: Comparação entre o método desenvolvido para a regeneração de GAC desenvolvido no arranjo experimental e o da literatura

MÉTODO	ARRANJO EXPERIMENTAL	LITERATURA
Uso de filtro químico de EPR	Sim	Sim
Uso de GAC comercial	Sim	Sim e outros <u>tb</u>
Uso de Vapor d'água para dessorção de <u>VOCs</u>	Sim	Sim
C <sub>TOLUENO</sub> (ppm)	8.041	200
Fluxo da mistura (L.min <sup>-1</sup> )	60	60
<u>Breakthrough time</u> (min)	5,5	>40
Secagem (aquecimento)	Estufa	Micro-ondas
Ca Tolueno (mg.g <sup>-1</sup> )	110,2	190

Fonte: Autor

Adotando-se o processo de regeneração de filtros químicos, proposto neste trabalho, o seu descarte será significativamente reduzido, pois haverá condições de seu reuso, ou seus componentes poderão ser reciclados e transformados em matéria prima secundária, o que contribuirá com as práticas da economia circular.

Além disso, o índice Ca, aqui estabelecido, poderá ser utilizado pelos fabricantes de EPRs, como um método para o controle de qualidade, a ser aplicado para a comparação entre lotes do mesmo fabricante, bem como entre fabricantes e formatos de grãos distintos.

Admitindo-se que se o ar do ambiente de trabalho do pintor industrial, está com maior concentração de VOCs, menor será o tempo de saturação, obrigando-o a fazer maior número de trocas de filtros químicos usados, aumentando o seu volume de descarte. Este fato norteou a realização desse trabalho com vistas ao conceito de sustentabilidade, uma vez que se os filtros químicos podem ser reutilizáveis, menor quantidade dos mesmos será descartada em aterros sanitários ou incineradores.

Estima-se que para 10.000 unidades de cartuchos VO para respirador SF, do modelo utilizado nos ensaios e comercializados por fabricante nacional, será evitado o descarte ao meio ambiente dos seus componentes, nas quantidades inseridas na Tabela 9.

Tabela 9: Massas dos componentes do cartucho, estimados para 10.000 unidades

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

Fonte: Autor

Portanto, com a possibilidade de se regenerar os filtros químicos, pode-se evitar que os mesmos sejam destinados a Aterros Sanitários Classe I ou incinerados, na prática da sustentabilidade e no conceito da EC.

## 5 CONCLUSÕES

Estabeleceu-se um método de ensaio com a construção de um arranjo experimental, onde os filtros químicos de EPR tipo SF foram submetidos aos ensaios de regeneração.

O emprego de vapor d' água aquecido se mostrou eficiente para a dessorção de VOCs adsorvidos nos GACs de filtros químicos, permitindo a coleta posterior da mistura de condensados.

A permanência do filtro químico por 12 horas em estufa permitiu a remoção da água e tolueno residuais que estavam presentes no interior e superfície dos microporos, mesoporos e dos poros dos GACs, propiciando um acréscimo da sua capacidade adsortiva, que foi observada nos ensaios de adsorção seguintes, onde se obteve maior valor de  $M_{VOC}$ .

Os valores obtidos para o Índice de Regeneração (IR) foram em média  $99,98 \pm 0,01 \%$  e  $CV = 7,43 \%$  indicando baixa dispersão sobre a média.

A capacidade de adsorção de vapores de tolueno pelo GAC do filtro químico, aqui denominada de coeficiente adsortivo ( $C_a$ ) foi em média de  $C_{a_m} = 110,2 \pm 0,1 \text{ mg.g}^{-1}$ , ou seja, menor do que os valores relatados na literatura com ambiente de menor concentração de tolueno. O tempo de saturação ou *breakthrough time* do filtro químico foi em média  $5,5 \pm 0,2 \text{ min}$ , no fluxo de  $60 \text{ L.min}^{-1}$ . Este indicador poderá ser utilizado pelos fabricantes de EPRs, para o controle de qualidade, pois permitirá a comparação entre lotes de GACs com diversos tipos de formatos, dimensões e procedências.

Uma vez que os filtros químicos possam ser reutilizáveis, menor será o volume dos mesmos que serão descartados em Aterros Sanitários ou incineradores.

A possibilidade da recuperação do filtro químico saturado por tolueno, submetido ao método proposto, oferece uma alternativa viável para o manejo sustentável do filtro químico e de seus componentes. As indústrias fabricantes de EPRs ou via empresas recicladoras, poderão realizar a prática da logística reversa, orientando os seus consumidores de EPRs a seguir os preceitos da PNRS.

Este trabalho abre oportunidades para que empresas recicladoras realizem o serviço de coleta de solventes adsorvidos nos GACs desses filtros químicos descartados, separação do GAC e das embalagens do material do corpo e do disco de retenção de GACs, com o objetivo de retornarem novamente ao processo produtivo das indústrias fabricantes de EPRs ou em outras aplicações industriais, sendo utilizados como matéria prima secundária para fabricação de outros produtos, com o conceito da EC.

Este trabalho de pesquisa não esgota o tema regeneração de GACs usado em filtro químico de EPR tipo SF, e, portanto, abre discussões e oportunidades a futuros trabalhos de pesquisas tanto na área de Segurança e Saúde do Trabalho como na Ambiental, a partir da metodologia apresentada.

## REFERÊNCIAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8.419**: Diretrizes Técnicas dos Elementos Essenciais aos Projetos de Aterros. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 10.004**: Resíduos Sólidos-Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 13.230**: Simbologia e Terminologia Aplicada a Reciclagem de Plástico. Rio de Janeiro, 2009a.

\_\_\_\_\_. **NBR 14.725-4**: Ficha de Informação de Produto Químico-FISPQ. Rio de Janeiro, 2009b.

\_\_\_\_\_. **NBR 13.696**: Equipamentos de Proteção Respiratória-Filtros Químicos e Combinados. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 15.211**: Tintas para construção civil: verniz brilhante à base de solvente para uso interior - requisitos de desempenho de tintas para edificações não industriais. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 12.543**: Equipamentos de Proteção Respiratória- Terminologia. Rio de Janeiro, 2017.

ABRELPE-Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2016**, v. 1, p. 64, 2016

ACGIH- *American Conference of Governmental Industrial Hygienists*. **TLVs® e BEIs®**: baseados na documentação dos limites de exposição ocupacional (TLVs) para substâncias químicas e agentes físicos & índices biológicos e exposição (BEIs). Tradução ABHO. São Paulo: ABHO, 2018

AEP- Associação Empresarial de Portugal. **Manual Prático de Ecodesign**. Gabinete de Projetos Especiais. Portugal, 2013

ALBUQUERQUE, J. B. Torres de. **Resíduos sólidos**. Leme: Independente, 2011

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

ALMEIDA, I. L. S. **Avaliação da Capacidade adsortiva da Torta de Moringa Oleifera para BTEX em Amostras Aquosas**. Universidade Federal de Uberlândia. Instituto de Química. Dissertação (Mestrado), Uberlândia, 2010

AMEH, C.U; JIMOH, A.; ADBULKAREEM, A.S.; OTARU, A.J. Experimental Studies on Bioregeneration of Activated Carbon Contaminated with Hydrocarbon. IOSR-JAC.

**Journal of Applied Chemistry.** Department of Chemical Engineering. Federal University of Technology. Minna, Nigeria, 2013.

ANIMASEG-ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE MATERIAL DE SEGURANÇA E PROTEÇÃO AO TRABALHO **Indicadores do Mercado Brasileiro de Equipamentos de Proteção Individual.** São Paulo, 2017.

ARCHI, C. D. M. F. Cenário Mundial dos Resíduos Sólidos e o Comportamento Corporativo Brasileiro Frente à Logística Reversa. **Perspectivas em Gestão & Conhecimento**, João Pessoa, v. 1, n. 2, p. 118-135, jul./dez., 2011.

ATIKINS, P.W. **Físico Química.** 3ª ed. Version em español de Bárbara Loeb Luschow (Universidade Católica de Chile) y Miguel Angel Rios Fernandez (Universidad de Santiago de Compostela, España). Addison-Wesley Iberoamericana S.A, Wilmington, Delaware, E.U.A., 1986.

AZARGOHAR, R.; DALAI, A.K. Production of activated carbon from Luscar char: Experimental and modeling studies. **Microsporous and Mesoporous Materiais.** Vol.85 p.219-225. Agosto, 2005.

AZARGOHAR, R.; DALAI, A.K. The direct oxidation of hydrogen sulphide over activated carbons prepared from lignite coal and biochar. **The Canadian Journal of Chemical Engineering.** Vol. 89. p.:844 – 853. Agosto, 2011.

BANALARY, J. A. G.; FLOYD, E. L. e LUNGU, C. T. **Breakthrough Curves for Toluene Adsorption on Different Types of Activated Carbon Fibers: Application in Respiratory Protection.** Annuary Occupational Hygiene. Vol. 59, no.4,481-490, 2015.

BARBOSA, R. P.; IBRAHIN, F. I. D. **Resíduos Sólidos, Impactos, Manejo e Gestão Ambiental.** São Paulo: Saraiva., 2014.

BENKHEDDA, J.; BARTH, D.; JAUBERT, J-D; PERRIN, L. Adsorption isotherms of m-xylene on activated carbon: Measurements and correlation with different models. **The Journal of Thermodynamics.** 32(3):401–411.France. March, 2000.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Agência Nacional da Vigilância Sanitária. Resolução - ANVISA RDC nº 3 de 2 janeiro de 2001 **Adoçantes: Limitações e Aprovações.** Disponível em:

<[http://portal.anvisa.gov.br/documents/33880/2568070/RDC\\_12\\_2001.pdf/15ffddf6-3767-4527-bfac-740a0400829b](http://portal.anvisa.gov.br/documents/33880/2568070/RDC_12_2001.pdf/15ffddf6-3767-4527-bfac-740a0400829b)> / Acesso em: 10 out. 2017.

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. Lei 12.305, de 02/08/2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos-PNRS;** altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, 2010. Disponível em:

[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/112305.htm).. Acesso em: 06.nov.2018.

BRASIL. Ministério do Trabalho. Portaria Ministerial nº 3.214 de 08 de junho de 1978. **Normas Regulamentadoras**. Brasília, 1978.

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. **NR 6: Equipamentos de Proteção Individual-EPI**. Disponível em: < <http://trabalho.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR6.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2018a.

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. **NR 9: Programa de Prevenção aos Riscos Ambientais-PPRA**. Disponível em:< <http://trabalho.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR9.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2018b.

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. **NR 15: Atividade e Operações Insalubres**. Disponível em: < <http://trabalho.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR9.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2018c.

BÖHM, G.M. and SALDIVA, P.H.N. Viewpoint. Science as a promoter of environmental and human health: the experience of São Paulo's air pollution. **Ecosystem Health**. 1998.

BREVIGLIERO, E.; POSSEBON, J.; SPINELLI, R. **Higiene Ocupacional. Agentes Biológicos, Químicos e Físicos**. 1.ed. SENAC. 320p., 2006.

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.

BUSZEWICZ, G.; BAŃKA, K. **Determination of Denatonium Benzoate (BITREX) in Alcoholic Products by LC-APCI-MS. Problems of Forensic Sciences**. Department of Forensic Medicine-Medical Academy. Lublin, 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.

CCC-CALGON CARBON CORPORATION. **Ganular Activated Carbon for Respirators**. Disponível em:<<http://www.calgoncarbon.com/media/press-releases/2017-06-11/calgon-carbon-announces-third-quarter-2017-results/>>. Acesso em: 17.dez.2017.

CDC- Centers of Disease Control. **Toluene overview**. Disponível em: <<https://www.cdc.gov/niosh/topics/toluene/>>. Acesso em 19 nov. 2018.

CENTRAL ANALÍTICA do IQ-USP, 2018. **Espectrometria de massas – EM**. Disponível em : < [http://ca.iq.usp.br/novo/paginas\\_view.php?idPagina=12](http://ca.iq.usp.br/novo/paginas_view.php?idPagina=12)>. Acesso em 11.set.2018.

CETESB-COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **CADRI**. Disponível em: <[www.cetesb.sp.gov.br/licenciamento/pdf/CADRI.pdf](http://www.cetesb.sp.gov.br/licenciamento/pdf/CADRI.pdf)>. Acesso em: 21 maio.2018.

CHEMICALBOOK. **Volatile Organic Compounds in the atmosphere**. Disponível em: <<https://www.chemicalbook.com/ProductChemicalPropertiesCB0130912EN.htm>>. Acesso em: 10 nov.2017.

CHRISTENSEN, S.; ELTON, J. **Soil and groundwater pollution**. Civil and Environmental Engineering Department Virginia Technology. 1998. Disponível em <<http://ewr.cee.vt.edu/environmental/teach/gwprimer/btex/btex.html>>. Acesso em 17 maio.2018.

CLAUDINO, A. **Preparação de carvão ativado a partir de turfa e sua utilização na remoção de poluentes**. Florianópolis: Universidade de Santa Catarina. Dissertação (Mestrado)., 2003.

CONSULTECH GROUP. **Spray paint booths**. Disponível em: <http://www.consultechindia.com/water-wash-paint-booth.html>> Acesso em 18 nov. 2018.

COSTA, B. S.; RIBEIRO, J. C. J. **Gestão e gerenciamento de resíduos sólidos: direitos e deveres**. Lumen Juris. Rio de Janeiro, 2013.

CONAMA nº 430 13/05/2011. **Controle da Poluição Sonora e do Ar**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=230>>. Acesso em: 05 nov.2017.

CONAMA nº 313 29/10/2002. **Dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=230>>. Acesso em: 10 fev.2018.

DABROWSKI, A. Adsorption- From Theory to Practice. **Advances in Colloid and Interface Science**. Vol. 93, p. 155-224, 2001.

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

DIAS, D.L. **Espectroscopia de Fluorescência Aplicada ao Estudo das Interações de Formação de Nanoestruturas de Peptídeos Contendo Maguemita**. Instituto de Química. Dissertação (Mestrado). Goiânia, 2014.

DINÂMICA QUÍMICA. **FISPQ: TOLUOL PA- ACS**. Disponível em: <<http://dinamicaquimica.com.br/freagentes/TOLUOL.pdf>>. Acesso em 10 abr.2018.

EPA-Environmental Protection Agency (USA): Indoor Air Quality (IAQ). **Volatile Organic Compounds' Impact on Indoor Air Quality**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/volatile-organic-compounds-impact-indoor-air-quality#intro>>. Acesso em: 20 mar.2018.

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. **Technical Overview of Volatile Organic Compounds**. Disponível em: <<<https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/technical-overview-volatile-organic-compounds>>>. Acesso em: 10 nov. 2019.

ERNSTGARD L., IREGREN A., SJOGREN B., SVEDBERG U., JOHANSON G. Acute effects of exposure to hexanal vapors in humans. **Journal of Occupational and Environmental Medicine**/American College of Occupational and Environmental Medicine. Vol. 48, p. 573:580. 2006

FAULCONER, E.K. **Effects of activated carbon surface chemistry modification on the adsorption of mercury from aqueous solution.** University of Florida, 2012.

FOGLER, H.S. **Elements of Chemical Reaction Engineering.** 3rd ed., Prentice-Hall, 1998.

FUNDACENTRO. **Programa de Proteção Respiratória (PPR):** recomendações, seleção e uso de respiradores. 4ªed. FUNDACENTRO. São Paulo. 209p, 2016.

GOUVEIA, J. L. N. **Descarte de resíduos químicos na região metropolitana de São Paulo, seus impactos socioambientais – Uma proposta de política pública para enfrentamento de situações emergenciais.** IPEN. Tese (Doutorado). São Paulo, 2015.

GÜRSES, A.; DOCGAR, C.; KARACA, S.; AÇIKYLDIZ, M. BAYRAK, R. Production of granular activated carbon from waste Rosa canina sp. Seeds and its adsorption characteristics for dye. **Journal of Hazardous Materials.** Vol. 131 p.254-259., nov.,2005.

HORI, H.; ISHIDAO, T; ISHIMATSU, S. Thermal Reconditioning Characteristics of a Respirator Cartridge for Organic Vapors Using Humid Air as Desorption Gas. **Journal of Occupational Health.** University of Occupational and Environmental Health, Japan.52:125-131, 2010.

HORNG, R.S.; TSENG, I.-C. Regeneration of granular activated carbon saturated with acetone and isopropyl alcohol via a recirculation process under H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV oxidation. **Journal of Hazardous Materials.** Elsevier. Taiwan. p.366-372, 2008.

IARC-INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER. **Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans Volume 77.** Lyon. France., 2003.

ILO-International Labor Office. Safe work and safety culture. **The ILO report for world day for safety and health at work 2018.** ILO, 2018. Disponível em <https://www.ilo.org/global/topics/safety-and-health-at-work/lang--en/index.htm>. Acesso em: 26.nov 2018.

ISO-INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Relevance of ISO 14001. **Using ISO 14001 to support value creation in business.** Disponível em: <<http://www.iso.org/sites/14000-briefing-note/>>. Acesso em: 21 out.2017.

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

JARDIM, A.; YOSHIDA, C.; FILHO, J. V. M. **Política Nacional. Gestão e Gerenciamento de Resíduos Sólidos**. Coordenação: Arlindo Philippi. Coleção Ambiental. São Paulo: Manole; PUC., 2012

JUNQUEIRA, T. L.; ALBUQUERQUE, E.L., TOMAZ, E. Estudo sobre compostos orgânicos voláteis em Campinas- SP. In: **VI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica**, Campinas., 2005.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. **Resources, Conservation and Recycling**. Vol. 127. Pages 221-232. Dec., 2017.

KLAASSEN, C. D.; AMDUR, M. O.; DOULL, J. **Casarett and Doull's Toxicology: The Basic Science of Poisons**. 5th ed. MacGraw-Hill. New York, USA. 1111p. 1996.

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

LÁSZLÓ, K.; PODLOSCIELNY, P; DABROWSKI, A. **Heterogeneity of activated carbons with different surface chemistry in adsorption of phenol from aqueous solutions**. Applied Surface Science v.252 p.5752-5762, setembro, 2005.

LEGNER, C. Adsorção por Carvão Ativado. **Revista Meio Filtrante**. Edição 88. Set./Out., 2017.

LI, L. Effects of activated carbon surface chemistry and pore structure on the adsorption of organic contaminants from aqueous solution, **NCSU Libraries**, 2002.

LIED, E. B. Dimensionamento de sistema de ventilação local exaustora (VLE): estudo de caso de uma indústria de móveis, em STª Terezina de Itaipu, PR, Brasil. **Estudos Tecnológicos**- vol 7, nº 1:1-11. Jan., 2011.

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

LINDERS, M. J. G.; MALLENS, E. P. J.; VAN BOKHOVEN, J. J. G. M.; KAPTEIJN, F.; MOULIJN, J. A. **Breakthrough of Shallow Activated Carbon**, 2007.

MACINTYRE, A.J. **Ventilação Industrial e Controle de Poluição**. Universidade de Minas Gerais. Editora Guanabara Koogan. Belo Horizonte-MG., 1990.

McKEE, R. H; TIBALDI, R, ADENUGA, M. D., MARGARY, A. Assessment of the potential human health risks from exposure to complex substances in accordance with REACH requirements. "White spirit" as a case study. **Regulatory Toxicology and Pharmacology**. P. 439-457, 2018.

MAGALHÃES, A. F. A. **As intoxicações no Brasil, qual é a realidade?** Universidade de Brasília. Departamento de Toxicologia. Disponível em <[http://www.toxicologia.unb.br/?pg=desc-noticias\\_foco&id=3628.10.2016](http://www.toxicologia.unb.br/?pg=desc-noticias_foco&id=3628.10.2016)>. Acesso em 27mar.2018

MARSH, H.; Francisco Rodríguez-Reinoso, F. **Activated Carbon**. Elsevier, 554 p., 2006.

MENDES, C. R.; SIEMON, F.B.; CAMPOS, M. M. **Estudo de Caso da Indústria 4.0 Aplicados em uma Empresa Automobilística**. FOSGERE.v.1,n.4,p.15-25, 2017.

MOREIRA, J. V. **Estudo Termodinâmico da Região Linear das Isotermas de Adsorção em Sílica C<sub>18</sub> para os Componentes da Síntese do Piperonal a Partir do Óleo Essencial da Síntese do Piperonal a partir do Óleo Essencial da Piper Hispidinervum C.DC**. Dissertação (Mestrado). UNICAMP. Campinas/SP, 2013.

MOTTA JR, E. Vernizes Intercalados: Uso e Virtudes. **GE- Conservación** nº 3., 2012.

MOURA, L. A. A. **Qualidade e Gestão Ambiental**. Belo Horizonte/MG. Del Rey, 216p, 2011.

NAIME, R.; ASHTON, E.; HUPFFER, H. M. Do Design ao Ecodesign: Pequena História, Conceitos e Princípios. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**. REGET/UFSM. V(7), nº 7, p. 1510-1519, MAR-AGO, 2012.

NASCIMENTO, R. F.; LIMA, A. C. A; VIDAL, C. B; MELO, D. Q.; RAULINO, G. S. C. **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. Imprensa Universitária. Universidade Federal do Ceará (UFC). Fortaleza. 256p. 2014

NIOSH- NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH. 2016. **Pocket Guide for Chemical Hazards**. U.S. Department of Health and Human Services. Public Health Services for Disease Control and Prevention. Cincinnati, Ohio. Disponível em <<http://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/method-e.html>>. Acesso em: 17 maio.2018.

NATIVIDADE, D. P. **Uso de Adoçantes Dietéticos: Orientações para Profissionais de Saúde e de Ensino**. 62 f. Dissertação (Mestrado Profissional). Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA. Pós Graduação em Ensino em Ciências da Saúde e do Meio Ambiente, Volta Redonda-RJ, 2011.

NELSON, G. O.; HARDER, C. A. **Respirator cartridge efficiency studies: V.Effect of solvent vapor**. Industrial Hygienist Association Journal. 1974.

NIOSH-National Institute for Occupational Safety and Health. Centers of Disease Control (CDC). **Immediately Dangerous to Life or Health (IDLH) Values**. Disponível em: <<https://www.cdc.gov/niosh/idlh/default.html>>. Acesso em: 27 nov. 2018.

O'REIL, M. J. **Merck Index 15h Edition**. Pharmabooks. 2708 p., 2013.

OSHAS- OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY MANAGEMENT SYSTEM – **REQUERIMENTS: OHSAS 18.001:2007**. Disponível em: <[www.ohsas-18001-occupational-health-and-safety.com/](http://www.ohsas-18001-occupational-health-and-safety.com/)> Acesso em 10 out.2017.

OGA, S.; CAMARGO, M.M.A.; BATISTUZZO, J. A.O. **Fundamentos de Toxicologia**. Ed. Atheneu.4.ed; São Paulo, 2014.

OKAWA, K.; SUZUKI, K.; TAKESHITA, T; et al. Regeneration of granular activated carbono with adsorbed trichloroethylene using wet peroxide oxidation. **Water Research**. Volume: 41, páginas 1045-1051, março, 2007.

OLIVEIRA, L. C. A.; GONÇALVES, M.; OLIVEIRA, D. Q. L.; GUERREIRO, M. C.; GUILHERME, L. R. G.; DALLAGO, R. M.; J. **Hazard. Mater**. p.141: 344.,2007

OLIVEIRA, J. M. **Noções de Ventilação Industrial**. Disponível em: <[http://servidor.demec.ufpr.br/disciplinas/TM120/VENTILACAO\\_INDUSTRIAL.pdf](http://servidor.demec.ufpr.br/disciplinas/TM120/VENTILACAO_INDUSTRIAL.pdf). > Acesso em 20 nov. 2018.

OLSON, K. R. et al. **Manual de Toxicologia Clínica**. Mac GrawHill Education. Tradução: Denise Costa Rodrigues, Maria Elisabete Costa Moreira; Revisão Técnica: Rafael Linden. Dados eletrônicos. 6ª ed. MacGrowHill Porto Alegre- AMGH, 2014.

OMS-Organização Mundial da Saúde. **Publicações da OMS**. Disponível em: <<https://www.who.int/eportuguese/publications/pt/>>. Acesso em: 10 dez.2018.

PIVA, A. M; WIEBECK, H. **Reciclagem do Plástico: Como Fazer da Reciclagem um Negócio Lucrativo**. ABPol. Artiber Ed. São Paulo. 107p., 2004

RAMAZZINI, B. **As doenças dos trabalhadores**. Tradução para o português do De Morbis Artificum Diatriba .In.: Dr. Raimundo Estrêla. 4ª edição. FUNDACENTRO. São Paulo. 2016.

RUPPENTHAL, J. E. **Toxicologia**. Universidade Federal de Santa Maria. Rede e-Tec Brasil. 128 p., 2013.

RUTHVEN, D.M. **Principles of Adsorption and Adsorption Processes**. John Wiley Sons, Inc., Canada. 1984.

SALIBA, T. M. **Manual Prático de Higiene Ocupacional e PPRA**. Ed. LTR, 6ª ed. , São Paulo, 2014.

SBPR-SISTEMA BRASILEIRO DE PROTEÇÃO RESPIRATÓRIA (*Air Safety*). **Respiradores semifaciais e filtros do modelo Air Tox II**. Disponível em : <http://grupoairsafety.com.br/v4/index.php/produtos/semifacial/linha-air-tox/air-tox-ii>> Acesso em 20.jul 2018.

SCHWARTZMAN S. Prefacio. In: Kotaka E.T., Zambrone F.A.D. **Contribuições para a construção de diretrizes de avaliação do risco toxicológico de agrotóxicos**. São Paulo: ILSI, 2001.

SILVA, W. J. **Produção de Filtrantes ativados a partir de aproveitamento de Resíduos: uma proposta para a Proteção Respiratória Ocupacional**. UFRN.149f. Natal. Tese (Doutorado), 2015.

SHIBAO, F. Y.; MOORI, R. G.; SANTOS, M. R. **A Logística Reversa e a Sustentabilidade Empresarial**. XIII SEMEAD-Seminários em Administração. Set, 2010.

SOBOTTA, R. H. J. **Atlas de anatomia humana**. Disponível em : <<https://anatomiaartistica.files.wordpress.com/2014/09/sobotta-atlas-de-anatomia-humana-volume-2.pdf>>. Acesso em: 26 set. 2018.

SOLURI, D.; NETO, J. **SMS: Fundamentos em Segurança, Meio Ambiente e Saúde**.LTC.1ªed. Rio de Janeiro.292p., 2015.

TAI, H-S; LEE, C-L. Desorption of methyl-ethyl-ketone from granular carbon with microwave radiation. **American Institute of Chemical Engineers Environ Progress**. Vol. N° 26: 299-303, 2007.

TAUCITA, F.M.; SANTOS, P. M. S.; ALMEIDA, V. **Presença de Robôs de Pintura na Indústria Automobilística**. Fundação Dom Bosco, 2015.

TORLONI, M.; VIEIRA, A. V. **Manual de Proteção Respiratória**. São Paulo, 520p, 2003.

WANG, S; COOMES, Z. H. Z.; HAGHSERESHT, F.; LU, G.Q. The physical and surface chemical characteristics of activated carbons and the adsorption of **methylene blue from wastewater**. Journal of Colloid and Interface Science, v. 284, p. 440-446. 2004.

WHO-World Health Organization. **Workers' health: global plan of action Sixtieth World Health Assembly**. Disponível em: <[http://www.who.int/occupational\\_health/WHO\\_health\\_assembly\\_en\\_web.pdf?ua=1](http://www.who.int/occupational_health/WHO_health_assembly_en_web.pdf?ua=1)>. Acesso em 13 nov. 2018.

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

## APÊNDICES

### APÊNDICE A- Cálculo da concentração inicial de tolueno utilizados nos ensaios de adsorção

Foram adsorvidos nos GACs dos filtros químicos em média 10 g de VOCs do tolueno, através de passagem da mistura VOCs e ar num fluxo de 60 L.min<sup>-1</sup>, no *breakthrough time* médio de 5,5 ± 0,2 min (Tabela 10).

Tabela 10: Tempo médio de saturação obtido no ensaio de adsorção de cada filtro químico

	Filtro químico 1	Filtro químico 2	Filtro químico 3	Filtro químico 4	Filtro químico 5	Média	Desvio Padrão
Tempo de saturação médio (min.)	5,7	5,3	5,6	5,5	5,4	5,5	0,2

A concentração de tolueno ( $C_{\text{tolueno}}$ ) é definida, pela Equação 5:

$$C_{\text{tolueno}} = \frac{M_{\text{VOC}}}{V} \text{ [mg.m}^{-3}\text{]} \quad (5)$$

Onde:

$$\begin{aligned} C_{\text{tolueno}} &= \text{concentração de tolueno [mg.m}^{-3}\text{]} \\ M_{\text{VOC}} &= \text{massa de tolueno [mg]} \\ V &= \text{volume da mistura VOCs+ar [m}^3\text{]} \end{aligned}$$

Sendo que:

$$M_{\text{voc}} = 10 \text{ g} = 10^4 = X \text{ [mg];}$$

$$V = \text{fluxo (ar +VOC) [L.min}^{-1}\text{]} \cdot t \text{ [min]} \times 10^{-3} = Y \text{ [m}^3\text{]}$$

Substituindo os valores da equação, teremos:

$$C_{\text{tolueno}} = \frac{x}{Y} = \frac{10}{60 \times 5,5} \times 10^6 = 30.303 \text{ mg.m}^{-3}$$

Portanto, o resultado da concentração de tolueno foi de:  $C_{\text{tolueno}} = 30.303 \text{ mg.m}^{-3}$

Segundo Torloni e Vieira (2003), para a conversão da concentração de tolueno de  $\text{mg.m}^{-3}$  para ppm, utiliza-se a equação 6.

$$X = \frac{Y \cdot 24,45}{\text{Mol}} \quad (6)$$

Onde:

X = concentração [ppm]  
 Y = concentração [ $\text{mg.m}^{-3}$ ]  
 Mol= peso molecular

Inseridos os valores obtidos, obtivemos o valor de  $C_{\text{tolueno}}$ :

$$C_{\text{tolueno}} = \frac{30.303 \times 24,45}{92,14} = 8.041 \text{ ppm}$$

Assim, a  $C_{\text{tolueno}}$  utilizada no arranjo experimental foi próxima de 8.041 ppm e este valor é bem acima da concentração de tolueno utilizada nos ensaios experimentais de Lilo-Ródena et al. (2016), que foi de 200 ppm. O resultado de se utilizar altas concentrações de tolueno, foi o reduzido *breakthrough time* obtido nos ensaios de adsorção realizados no arranjo experimental deste trabalho, que foi em média de  $(5,5 \pm 0,2)$  min.

## APÊNDICE B- Relatório de ensaio de vedação da Câmara 2

Data: 12/04/2018

Local: Laboratório de Tecnologia de Vácuo (LTV) da FATEC São Paulo

Título: Teste de vedação do dispositivo (Câmara 2 do Arranjo experimental)

Realizado o ensaio de vedação (entrada de ar externo) das conexões do dispositivo denominado Câmara 2, que contém um filtro químico com CAG em seu interior e é fabricada com 02 copos de alumínio, vedada ao centro por uma arruela de borracha e fixada por um acoplamento constituído por duas chapas de alumínio, pressionadas por 04 parafusos e porca tipo borboleta, sendo que há 04 espaçadores tipo buchas de plástico que fazem com que o aperto da arruela seja equilibrado. Nas duas pontas, ao centro há conexões metálicas para a passagem de ar de diâmetro 10 mm que estão vedadas por arruela de plástico em seu interior e anel *o'ring* de *viton*® ao lado externo. Inicialmente foi vedada a passagem de ar pela tubulação de entrada por um pino de plástico fixado com abraçadeira metálica e encaixado a tubulação de saída em uma válvula tipo “Y” onde uma das saídas foi fixado um medidor eletrônico de pressão Pirani conectado a um instrumento eletrônico analógico com visor, denominado *953 Gauge Controller – HPS Division*, com escala de 10<sup>-3</sup> a 100 ATM e a segunda saída foi conectado a tubulação da bomba a vácuo AEG 50 CFM/220V de 02 estágios.

Início dos testes: 10:30h

Encerramento dos testes: 12:38h

Figura 30: Bancada preparada para o ensaio de estanqueidade da Câmara 2



Figura 31: Fonte: Autor Visor do medidor de pressão Pirani



Fonte: Autor

Figura 32: Encerramento do teste



Fonte: Autor

## Resultados obtidos

Tabela 11: Pressão x  $\Delta t$  no teste de estanqueidade da Câmara 2

<b>Medidor Pirani Pressão (torr)</b>	<b><math>\Delta t</math> (min)</b>
4	3
2	27
1,2	38

Fonte: Autor

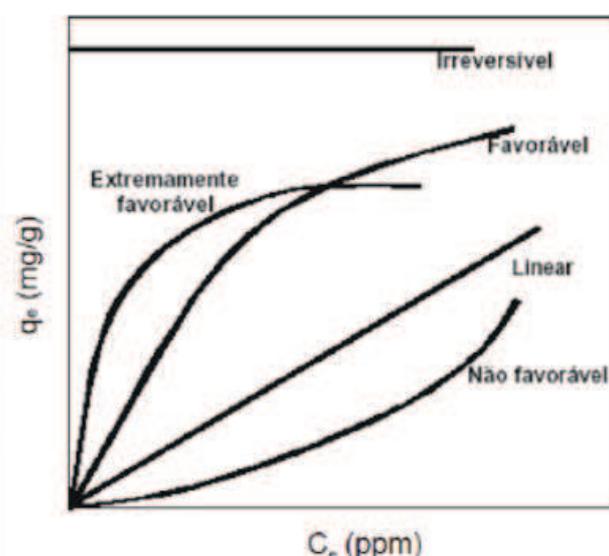
## Conclusão

Houve a redução de pressão pela sucção do dispositivo metálico (Câmara 2), que acondiciona o filtro químico com GAC nos 30 minutos iniciais e posteriormente a pressão ficou estabilizada, sem que houvesse a entrada de ar externo, provando que a Câmara 2 apresenta estanqueidade suficiente para ser utilizada no arranjo experimental proposto.

## APÊNDICE C- Isotermas de adsorção

A adsorção de vapores da atmosfera é um fenômeno de superfície onde as moléculas de vapores são concentradas e ligadas pela atração intermolecular a uma camada de superfície coletora. Na equação de equilíbrio termodinâmico de Gibbs (GIBBS et al.,1883), se a variação de entalpia ( $\Delta H$ ) for negativa, revela que a adsorção é também um processo exotérmico. Sob condições de equilíbrio a uma temperatura constante, o volume de vapor adsorvido na fase coletora é proporcional à pressão do vapor representado por isotermas de Freundlich, conforme Figura 33.

Figura 33: Isotermas de adsorção



Fonte: MOREIRA (2013)

### Onde:

- Isoterma linear: indica que a quantidade adsorvida é proporcional a concentração do fluido, não indicando uma capacidade máxima para adsorção;
- Isotermas côncavas: são chamadas favoráveis por extrair quantidades relativamente altas mesmo em baixos níveis de concentração de adsorbato no fluido;
- Isotermas convexas: são chamadas desfavoráveis ou não favoráveis devido à sua baixa capacidade de remoção em baixas concentrações. Isotermas desfavoráveis são raras, mas muito importantes para entender o processo de regeneração, isto é, transferência de massa do sólido de volta para a fase fluida, quando a isoterma é favorável (MOREIRA,2013).

- Para Langmuir (1918) a adsorção sobre uma superfície uniforme, simples, infinita e não porosa e o modelo baseia-se na hipótese de movimento das moléculas adsorvidas pela superfície do adsorvente, de modo que, à medida que mais moléculas são adsorvidas, há uma distribuição uniforme formando uma monocamada que recobre toda a superfície. Utiliza o conceito dinâmico do equilíbrio de adsorção que estabelece a igualdade nas velocidades de adsorção e dessorção e no seu modelo, são utilizadas as seguintes hipóteses:
- Todas as moléculas adsorvem sobre sítios definidos do adsorvente;
- Cada sítio pode ser ocupado por apenas uma molécula, ou seja, a adsorção é monomolecular;
- A energia de adsorção de cada sítio é igual, ou seja, a superfície é energeticamente homogênea.

Com este teste preliminar, foram capazes de selecionar a faixa de 24 a 36 h como a duração dos experimentos de isothermas de adsorção com GAC (20 a 25 mesh), trabalhando com concentrações de 0,7 a 50 mg.L<sup>-1</sup>. Também realizaram estudos da taxa de adsorção em recipientes herméticos e estudos de isothermas de dessorção. No estudo das isothermas de adsorção, estas apresentaram formato convexo, ou seja, favorável. Os autores obtiveram para a equação de Langmuir uma regressão insatisfatória, com considerável desvio a altas concentrações e desvio ligeiramente menor a baixas concentrações. Já para a isoterma de Freundlich, obtiveram excelente regressão, mas necessitam-se de diferentes representações de isothermas a cada uma das três faixas de concentrações trabalhadas ( $C_e < 1,35 \text{ mg.L}^{-1}$ ,  $1,35 < C_e < 25 \text{ mg.L}^{-1}$  e  $C_e > 25 \text{ mg.L}^{-1}$ ), sendo que o uso de uma única correlação para descrever toda a faixa de concentrações ( $0,7 < C_e < 50 \text{ mg.L}^{-1}$ ), proporcionou pior correlação. Os dois modelos de três parâmetros estudados correlacionaram melhor os dados experimentais, com uma única representação de equação de isoterma para toda a faixa de concentrações.

Se forma uma única camada molecular adsorvida conhecida como monocamada. Na adsorção, há uma diminuição da energia livre superficial do sistema: processo espontâneo, a variação da energia livre de Gibbs ( $\Delta G$ ) é menor que zero. Entretanto, há uma diminuição do número de graus de liberdade do sistema, pois as moléculas do adsorbato só podem se deslocar sobre a superfície do adsorvente, isto é a variação de entropia ( $\Delta S$ ) é menor que zero, conforme Equação 7 (ATIKINS, 1986).

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (7)$$

Onde:

$\Delta G$ : energia livre Gibbs [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $\Delta H$ : variação de entalpia (endotérmica ou exotérmica)  
 $T$ : temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $\Delta S$ : variação de entropia (desarranjo intermolecular)

Quando uma reação química espontânea ocorre, parte da energia liberada (reação exotérmica) sempre é utilizada para reorganizar o sistema (reorganizar os átomos). Segundo Gibbs et al. (1883), essa parte de energia depende da temperatura (T) e do nível de desorganização dos átomos ( $\Delta S$ ). A partir disso, Gibbs concluiu que a entalpia (energia liberada durante a reação), a entropia (desorganização molecular) e a temperatura são os fatores determinantes para prever a espontaneidade de uma reação (ATTIKINS, 1986).

Segundo Dias (2014), antes de 1883, acreditava-se que a espontaneidade de uma reação era determinada por apenas duas grandezas: a variação da entalpia ( $\Delta H$ ) e a variação da entropia ( $\Delta S$ ). A reação seria espontânea quando:

- $\Delta H < 0$  (reação exotérmica): há liberação de energia;
- $\Delta S > 0$ : o sistema reacional possui grande desorganização atômica.

Como a energia livre de Gibbs é a energia que sobra após uma reação química espontânea, logo, ela é liberada. Assim sendo, uma reação só é espontânea se o resultado for  $\Delta G < 0$ .

A expressão da energia livre de Gibbs só é aceita se a reação estiver sendo realizada sobre a pressão e temperatura constantes. A temperatura, no cálculo da energia livre de Gibbs, sempre deve estar na unidade Kelvin. A energia livre de Gibbs é a máxima energia que pode ser retirada de um sistema, ou uma reação (ATIKINS, 1986).

A adsorção, por ser um fenômeno de superfície e, dependente da área superficial do material adsorvente incluindo-se os seus poros (HAARRISON e PERRY, 1986). Os materiais adsorventes são sólidos altamente porosos com elevada área superficial (PAULOS; THRON 1976), têm a capacidade de adsorver grandes quantidades de vapores devido às suas grandes áreas superficiais, e por isso, são também mais adequados à retenção de VOC (CAO; HIEWITT, 1993).

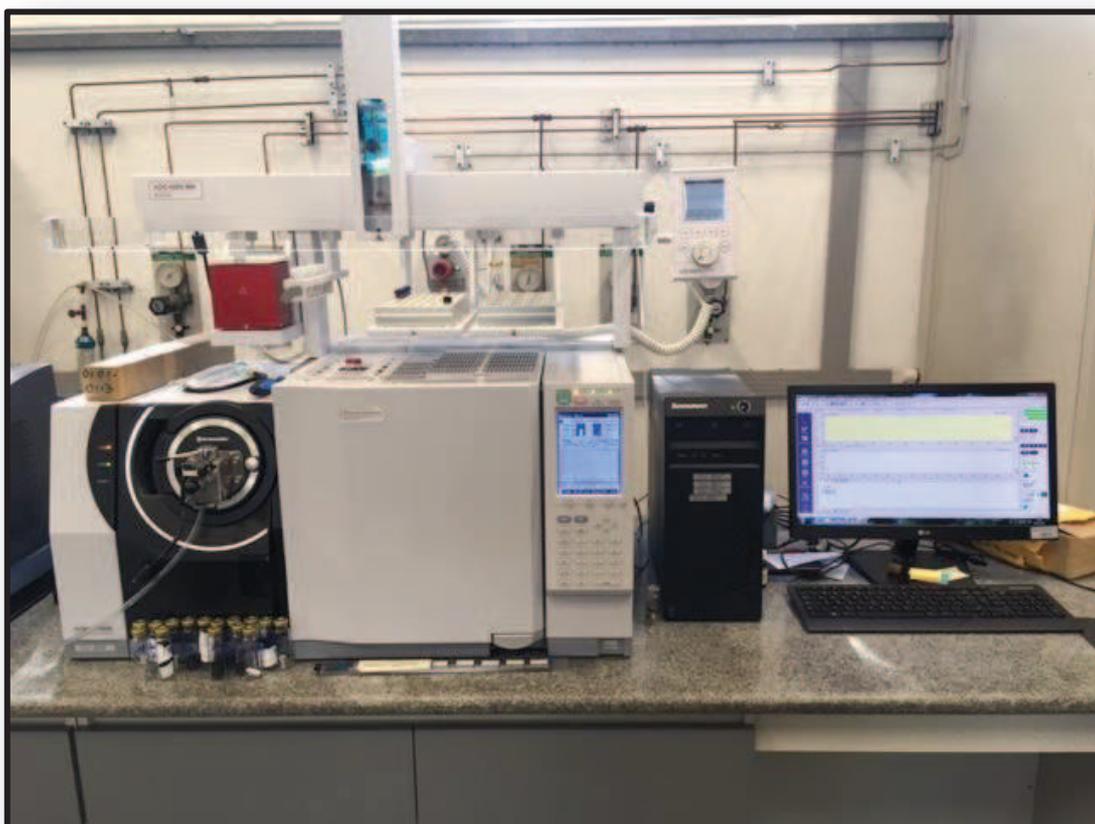
Hindarso et al. (2001) estudaram a adsorção em fase aquosa de benzeno e tolueno em GAC nas temperaturas de 30, 40 e 50  $^{\circ}\text{C}$ . Utilizaram carvão betuminoso na faixa granulométrica de 20 a 50 mesh do fabricante *Calgon Carbon Coporation* (CCC). As faixas de concentração

das soluções em estudo foram 100 a 550 mg.L<sup>-1</sup> e 50 a 450 mg.L<sup>-1</sup> para benzeno e tolueno em água, respectivamente. Para correlação dos dados de isotermas de equilíbrio da adsorção em fase líquida, os autores utilizaram as equações de Langmuir e Freundlich. A forma da isoterma de equilíbrio para ambos os casos foi convexa. A equação de Freundlich falhou na representação dos dados de equilíbrio em concentrações menores. Já a equação de Langmuir mostrou uma regressão bastante pobre, com um RMS (*Rot Mean Square*) de 13,74 % e 14,14 %, para benzeno e tolueno, respectivamente, com divergência positiva concentrações elevadas. As equações de isotermas de equilíbrio que melhor correlacionam os dados experimentais forma as equações de Toth e Sips, que são geralmente utilizadas quando se trabalha com adsorventes heterogêneos, como o carvão ativado; possuem parâmetros que são dependentes da temperatura e são de grande importância para a descrição de dados de equilíbrio de adsorção em uma faixa de temperaturas.

## APÊNDICE D- Cromatografia gasosa com detector de massa acoplado (GC-MS)

O espectrômetro de massa é constituído de quatro partes: um sistema de manipulação para inserir a amostra teste no equipamento, uma fonte de íons, na qual é produzido um feixe de partículas vindo da amostra, um analisador que separa partículas de acordo com a massa; um detector, no qual, os íons separados são recolhidos e identificados. A amostra pode ser introduzida na fonte de ionização (amostras puras) ou mediante cromatografia acoplada ao espectrômetro de massa, que pode ser cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC), cromatografia gasosa (GC), ou eletroforese capilar, permitindo que uma mistura seja separada em seus componentes que entram sequencialmente no espectrômetro de massa, resultando na análise individual de cada composto da mistura (IQ-USP, 2018).

Figura 34: Espectrômetro GC-MS



Fonte: CENTRAL ANALÍTICA do IQ-USP (2018)

## APÊNDICE E: Memorial de Cálculo do Índice de Regeneração (IR)

O Índice de Regeneração (IR) para cada ciclo de ensaios, denominado  $IR_{xy}$ , e neste cálculo, foram utilizadas as  $M_{VOC}$  de 1 a 4 para cada filtro químico submetido aos ciclos de ensaios, sendo que o símbolo “x” significa o número do filtro químico que foi de 1 a 5 e o símbolo “y” significa quantos cálculos de IR foram realizados, ou seja, de 1 a 3. Por exemplo, na equação abaixo,  $IR_{22}$ , significa índice de regeneração do cartucho nº 2 submetido ao 2º ciclo de regeneração, que resultou em 97,35 %, conforme ilustra o resultado do cálculo mostrado a seguir:

$$IR_{22} = 100 - \left\{ (100 \cdot [(10,4361 - 10,1601)] / 10,4361) \right\} = 97,35 \%$$

Utilizando a Equação 3, obteve-se o memorial de cálculo para todos os IRs, conforme ilustra o Quadro 2.

Quadro 2: Memorial de cálculo do Índice de Regeneração ( $IR_{xy}$ )

$$IR_{11} = 100 - \left\{ \frac{100 \cdot [(9,2350 - 9,9673)]}{9,2350} \right\} = 92,07 \%$$

$$IR_{12} = 100 - \left\{ \frac{100 \cdot [(9,9673 - 10,0678)]}{9,9673} \right\} = 98,99 \%$$

$$IR_{13} = 100 - \left\{ \frac{100 \cdot [(10,0678 - 10,0429)]}{10,0678} \right\} = 99,75 \%$$

$$IR_{21} = 100 - \left\{ \frac{100 \cdot [(9,0928 - 10,4361)]}{9,0928} \right\} = 85,22 \%$$

$$IR_{22} = 100 - \left\{ \frac{100 \cdot [(10,4361 - 10,1601)]}{10,4361} \right\} = 97,35 \%$$

$$IR_{23} = 100 - \left\{ \frac{100 \cdot [(10,1601 - 10,4603)]}{10,1601} \right\} = 99,70 \%$$

$$IR_{31} = 100 - \left\{ \frac{100 \cdot [(9,3337 - 10,8544)]}{9,3337} \right\} = 83,70 \%$$

$$IR_{32} = 100 - \left\{ \frac{100 \cdot [(10,8544 - 10,2614)]}{10,8544} \right\} = 94,53 \%$$

$$IR_{33} = 100 - \left\{ \frac{100 \cdot [(10,2614 - 10,2597)]}{10,2614} \right\} = 99,98 \%$$

$$IR_{41} = 100 - \left\{ \frac{100 \cdot [(9,2811 - 10,7129)]}{9,2811} \right\} = 84,57 \%$$

$$IR_{42} = 100 - \left\{ \frac{100 \cdot [(10,7129 - 10,1862)]}{10,7129} \right\} = 95,08 \%$$

$$IR_{43} = 100 - \left\{ \frac{100 \cdot [(10,1862 - 10,4290)]}{10,1862} \right\} = 97,61 \%$$

$$IR_{51} = 100 - \left\{ \frac{100 \cdot [(9,2175 - 10,4129)]}{9,2175} \right\} = 87,03 \%$$

$$IR_{52} = 100 - \left\{ \frac{100 \cdot [(10,4129 - 10,0879)]}{10,4129} \right\} = 96,87 \%$$

$$IR_{53} = 100 - \left\{ \frac{100 \cdot [(10,0879 - 10,3608)]}{10,0879} \right\} = 97,29 \%$$

Fonte: Autor

## APÊNDICE F: Memorial de cálculo do Coeficiente Adsorativo (Ca)

Utilizando-se a Equação 4, obteve-se o memorial de cálculo do Quadro 3, entende-se que no fator  $Ca_{xy}$ , o símbolo “x” significa o número do filtro químico (de 1 a 5) e o símbolo “y” é interpretado como o número de ciclos de ensaios de adsorção (de 1 a 4). Por exemplo:  $Ca_{23}$  foi calculado com o filtro químico nº 2, medido sua massa de GAC ( $M_{GAC(2)}$ ), no 3º ciclo de ensaios, onde foi realizado o ensaio de adsorção e medido a massa de VOCs ( $M_{VOC}$ ) retidas nos GACs desse filtro químico. Portanto:

$$Ca_{2,3} = 10,1601/90,4828 = 0,1123 \text{ [g.g}^{-1}\text{]} \text{ ou } 112,3 \text{ [mg.g}^{-1}\text{]}$$

Quadro 3: Memorial de cálculo para a obtenção do coeficiente adsorativo (fator  $Ca_{xy}$ )

$Ca_{11} = 9,2350 / 89,9721 = 0,1026$	$Ca_{21} = 9,0928 / 90,4828 = 0,1005$	$Ca_{31} = 9,3337 / 90,5003 = 0,1031$
$Ca_{1,2} = 9,9673 / 89,9721 = 0,1108$	$Ca_{2,2} = 10,4361 / 90,4828 = 0,1153$	$Ca_{32} = 10,8544 / 90,5003 = 0,1199$
$Ca_{1,3} = 10,0678 / 89,9721 = 0,1119$	$Ca_{2,3} = 10,1601 / 90,4828 = 0,1123$	$Ca_{33} = 10,2614 / 90,5003 = 0,1134$
$Ca_{1,4} = 10,0429 / 89,9721 = 0,1116$	$Ca_{2,4} = 10,4503 / 90,4828 = 0,1155$	$Ca_{34} = 10,2597 / 90,5003 = 0,1134$
$Ca_{41} = 9,2811 / 90,4960 = 0,1026$	$Ca_{51} = 9,2175 / 89,9891 = 0,1024$	
$Ca_{42} = 10,7129 / 90,4960 = 0,1184$	$Ca_{52} = 10,4129 / 89,9891 = 0,1157$	
$Ca_{43} = 10,1862 / 90,4960 = 0,1126$	$Ca_{53} = 10,0879 / 89,9891 = 0,1121$	
$Ca_{44} = 10,4290 / 90,4960 = 0,1152$	$Ca_{54} = 10,3608 / 89,9891 = 0,1151$	

Fonte: Autor

A média e desvio padrão de Ca, resultou no valor  $Ca_m = 110,2 \pm 0,1 \text{ [mg.g}^{-1}\text{]}$  no arranjo experimental cuja concentração de tolueno foi de aproximadamente 8.104 ppm ao fluxo de 60 L.min<sup>-1</sup>, cujo valor de  $Ca_m$  estabelecido foi inferior ao encontrado nos experimentos realizados por Lilo-Rodenas et al. (2006) com o mesmo produto químico tolueno, só que em baixa concentração, no valor de 200 ppm ao fluxo de 60 L.min<sup>-1</sup>, que resultou em Ca de 190 mg.g<sup>-1</sup>.

## ANEXOS

## ANEXO A- Relatório de Análise de Amostras PA e de condensados (Laboratório ALS)

A1: Boletim analítico da amostra de tolueno (retirado do vasilhame do fabricante Dinâmica Química), que foi inserido no kitassato (Câmara 1) do arranjo experimental.




**BOLETIM ANALÍTICO 440702/2018-1.0 A**  
 Processo Comercial 16410/2018

---

**DADOS DO SOLICITANTE**

Interessado: OLEBER CORREA VIEIRA  
 Endereço: Rua MARIA FRANCISCA, 292-São Paulo-SP - 02374-010  
 Nome do Solicitante: Oeber Correa Vieira

---

**DADOS DA AMOSTRA**

Projeto: Data/Hora de Coleta: 29/08/2018  
 Identificação da Amostra: T Responsável pela coleta: Cliente  
 Matriz: Água Tratada Data Entrada no Lab: 11/09/2018  
 Número de Grupo ALS: 50033/2018 Data de Elaboração do laudo: 26/09/2018  
 Código ALQ: 4839530

---

**RESULTADOS ANALÍTICOS**

**MÉTODOS ACREDITADOS**

*Parâmetros Analíticos*

Parâmetro	CAS	Unidade	Diluição	Resultado	LQ	LD	Ref.	Acron
Tolueno	108-88-3	µg/L	1000000	359900000	1000000	500000	106	440702/2018-1.0 A

---

**REFERÊNCIAS**

Ref.	Data de Preparação	Data de Análise	Mat. Preparada	Mat. Referente	Local de análise
106	---	25/09/2018	---	1000000000 - 2018	078, 022 ALS - São Paulo

---

**CONTROLES DE QUALIDADE**

*87172018-108 - VOC (Agua)*

Parâmetro	CAS	Unidade	Resultado	LQ	LD	Ref.
Tolueno	108-88-3	µg/L	11,8	10	100	106

*87172018 - Bact. G. M. M. - VOC (Agua)*

Parâmetro	CAS	Unidade	Resultado	LQ	LD	Ref.
Tolueno	108-88-3	µg/L	11,8	1,0	5,00	106

Figura 1 de 2 (Boletim Analítico 440702/2018-1.0 A)

Complexo Serviços Analíticos Ambiental S.Ltd. - Rua Lúcia de Souza - 1007 - São Paulo - SP - 02088-000 - Fone/Fax: (11) 4102-4322  
www.csa.com.br



## RESULTADOS ANALÍTICOS

## MÉTODOS ACREDITADOS

## Parâmetros Analíticos

Parâmetro	CAS	Unidade	Diluição	Resultado	LQ	LD	Ref.
Tolueno	108-88-3	µg/L	1000000	359900000	1000000	500000	106

A2: Boletim analítico da amostra de tolueno condensado, colhida após a adsorção completa dos GAC do filtro químico em teste.




**BOLETIM ANALÍTICO 440703/2018-1.0 A**  
 Processo Comercial 16410/2018

**DADOS DO SOLICITANTE**

Interessado: OLSEIR CORRÊA VIEIRA  
 Endereço: Rua MARIA FRANCISCA, 282 - São Paulo - SP - 02374-010  
 Nome do Solicitante: Odebrecht Cordeiro

**DADOS DA AMOSTRA**

Projeto: 1 - T - B  
 Identificação da Amostra: Água Tratada  
 Matriz: 30033/2018  
 Número de Grupo ALS: 433537  
 Código ALS: 433537

Data/Hora de Coleta: 28/09/2018  
 Responsável pela coleta: Cliente  
 Data Entrada no Lab: 11/09/2018  
 Data da Elaboração do laudo: 28/09/2018

**RESULTADOS ANALÍTICOS**

**MÉTODOS ACREDITADOS**

Parâmetros Analíticos

Parâmetro	CAS	Unidade	Diluição	Resultado	LQ	LD	Ref.
Tolueno	108-88-3	µg/L	10000	105600	10000	5000	106

**REFERÊNCIAS**

Ref.	Data de Processado	Data de análise	Ref. Projeto	Ref. Referência	Local de amostra
106		02/09/2018		LAB 440703/2018	CRB - 30033 - 4.3 - São Paulo

**CONTROLES DE QUALIDADE**

07170219 - L28 - VOC (água)

Parâmetro	CAS	Unidade	Resultado	Limite de CD (%)	Ref.
Tolueno	108-88-3	%	110	75 - 120	106

07170218 - Metais em Água - VOC (água)

Parâmetro	CAS	Unidade	Resultado	LQ	LD	Ref.
Tolueno	108-88-3	µg/L	1.12	1.0	5.00	106

**OBSERVAÇÕES TÉCNICAS**

Atenciosamente:

Os resultados estão correlacionados exclusivamente à amostra analisada.  
 O resultado de análise está sujeito a erros e incertezas inerentes a esse tipo de análise.

Figura 1 de 2 - Boletim Analítico 440703/2018-1.0 A

Companhia Saneamento Ambiental S.A. - Rua 1508/04, 1514 - Santana - São Paulo/SP CEP: 02061-000 - Fone/Fax: +55(11)4084-4000  
 www.csa.com.br



## RESULTADOS ANALÍTICOS

### MÉTODOS ACREDITADOS

#### Parâmetros Analíticos

Parâmetro	CAS	Unidade	Diluição	Resultado	LQ	LD	Ref.
Tolueno	108-88-3	µg/L	10000	105600	10000	5000	106

A3: Boletim analítico de amostra de tolueno da mistura condensada (tolueno e água) após a dessorção com vapor d'água.




**BOLETIM ANALÍTICO 440704/2018-1.0 A**  
 Processo Comercial 16410/2018

**DADOS DO SOLICITANTE**

Interessado:	OLCEBER CORREIA VIEIRA
Endereço:	Rua MARIA FRANCHINI, 292-880 Paulo SP - 02374-010
Nome do Solicitante:	Oleber Correa Vieira

**DADOS DA AMOSTRA**

Projeto:	Data/Hora de Coleta:	20/08/2018
Identificação da Amostra:	2 - 5 - B	Responsável pela coleta:
Matriz:	Água Tratada	11/09/2018
Número de Grupo ALS:	50393/2018	Data da Elaboração do laudo:
Código ALS:	4838538	20/09/2018

**RESULTADOS ANALÍTICOS**  
**MÉTODOS ACREDITADOS**

Parâmetros Analíticos

Parâmetro	CAS	Unidade	Diluição	Resultado	LQ	LD	Ref.	Item
Tolueno	108-88-3	µg/L	1000	18360	1000	500	106	1000 + 110.00

**REFERÊNCIAS**

Ref.	Data de Proposição	Data de Análise	Mét. Proposto	Mét. Referência	Local de análise
106	-	17/08/2018	-	106/PM 8000C - 2008	CBS 0001 46.4 - São Paulo

**CONTROLES DE QUALIDADE**

80002018 - CCB - VOC (água)

Parâmetro	CAS	Unidade	Resultado	Limite de CD (%)	Ref.
Tolueno	108-88-3	%	1,7	75 - 100	106

80002018 - Método de Método - VOC (água)

Parâmetro	CAS	Unidade	Resultado	LQ	LD	Ref.
Tolueno	108-88-3	µg/L	< 1,0	1,0	500	106

**OBSERVAÇÕES TÉCNICAS**

**Atenção:**  
 O resultado obtido corresponde exclusivamente à amostra analisada.  
 O resultado de amostra em outro local é superior sobre a base seca.

Página 1 de 1 Boletim Analítico 440704/2018-1.0 A  
Companhia Saneamento de São Paulo S.A. - Rua Augusta, 1555 - São Paulo - SP | Fone/Fax: (11) 4901-1000/4000  
 www.cosp.sp.gov.br



## RESULTADOS ANALÍTICOS

### MÉTODOS ACREDITADOS

Parâmetros Analíticos

Parâmetro	CAS	Unidade	Diluição	Resultado	LQ	LD	Ref.
Tolueno	108-88-3	µg/L	1000	18360	1000	500	106