



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA E
ENGENHARIA DE ALIMENTOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA**

**REAPROVEITAMENTO DE CHAMOTE DE PORCELANATO
PARA USO COMO ELEMENTO FILTRANTE EM
TRATAMENTO DE ÁGUA**

TIAGO ZANATTA

**FLORIANÓPOLIS
2013**

Tiago Zanatta

**REAPROVEITAMENTO DE CHAMOTE DE PORCELANATO
PARA USO COMO ELEMENTO FILTRANTE EM
TRATAMENTO DE ÁGUA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Humberto Gracher Riella

Coorientador: Prof. Dr. Adriano Michael Bernardin

Florianópolis
2013

Reaproveitamento de chamote de porcelanato para uso como elemento filtrante em tratamento de água

Por

Tiago Zanatta

Dissertação julgada para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Química**, área de concentração de **Desenvolvimento de Processos Químicos e Biotecnológicos**, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof. Dr. Humberto Gracher Riella
orientador

Prof. Dr. Adriano Michael Bernardin
coorientador

Prof. Dr. Ricardo Antônio Francisco Machado
coordenador

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Nivaldo Cabral Kuhnen

Prof.^a Dr.^a Elita Fontenele Urano de Carvalho

Prof. Dr. Elidio Angioletto

Florianópolis, 14 de março de 2013.

AGRADECIMENTOS

É preciso reconhecer que tudo que fora passado não foi fácil e que certamente muito mais difícil teria sido sem o imprescindível auxílio daqueles que me estenderam a mão. Por isso, agradeço imensamente:

À Universidade Federal de Santa Catarina, em especial à coordenação, funcionários e professores do programa de pós-graduação em Engenharia de Química, pela oportunidade e paciência;

Aos meus orientadores, Dr. Humberto Gracher Riella e Dr. Adriano Michael Bernardin, bem como ao professor Dr. Elidio Angioletto, sempre presentes e extremamente prestativos;

Aos amigos de vida e de curso;

Aos colaboradores do setor de controladoria, manutenção e de tratamento de água e efluentes da empresa onde este trabalho foi realizado;

Aos meus pais e minha irmã, fontes inesgotáveis de motivação;

A DEUS, alfa e ômega, princípio e fim.

“Ainda que eu falasse as línguas dos homens e dos anjos, se não tiver amor, sou como o bronze que soa, ou como o sino que retine. Mesmo que eu tivesse o dom da profecia, e conhecesse todos os mistérios e toda a ciência; mesmo que tivesse toda a fé, a ponto de transportar montanhas, se não tiver amor, não sou nada.”

I Coríntios, 13, 1-2

RESUMO

A deposição final dos resíduos da atividade humana na natureza é sempre um desafio. A busca pela reutilização de resíduos é fundamental nos dias atuais, onde a preocupação com o meio ambiente é cada vez maior. A indústria de revestimentos cerâmicos não é uma exceção a esta regra. Dentre os muitos resíduos gerados, a indústria de revestimentos cerâmicos consegue reaproveitar a maior parte em seu próprio processo. Mas o reaproveitamento das peças queimadas quebradas ainda é um desafio. Elas têm elevada dureza, e esta é a principal dificuldade de seu reaproveitamento no processo. Estudar formas alternativas para reaproveitar essas quebras é a opção ecologicamente correta mais viável. Então, este trabalho buscou estudar modos para reaproveitar as quebras queimadas de porcelanato em atividades distintas da própria cerâmica, em especial como elemento filtrante para o tratamento de água. Amostras de água coagulada foram filtradas em laboratório utilizando areia e quebras queimadas britadas como recheio para os filtros. A cada filtração realizada, os resultados obtidos pela areia e pela quebra queimada eram comparados. Ao final das filtrações, análises mais precisas para a detecção de elementos químicos nocivos à saúde humana foram realizadas na água filtrada por ambos os elementos filtrantes. A função destes ensaios era evidenciar se a areia dos filtros de água pode ser substituída por quebras queimadas britadas de porcelanato.

Palavras-chave: peças cerâmicas quebradas; reaproveitamento; elemento filtrante.

ABSTRACT

The final disposal of waste from human activity in nature is always a challenge. The search for the reuse of waste is essential nowadays, where concern for the environment is increasing. The ceramic tile industry is no exception to this rule. Among the many waste generated, the ceramic tile industry can reuse the most of them in your own process. But the reuse of broken fired pieces is still a challenge. They have high hardness, and this is the main difficulty for its reuse in the process. Studying alternative ways to reuse these breaks is the most viable environmentally option. So, this study aimed to examine ways to reuse broken pieces of burned porcelain tiles in different economic activities, particularly as filtering element for water treatment. Coagulated water samples were filtered in the laboratory using sand and crushed pieces of porcelain tiles as filling for the filters. Each filtration performed, the results obtained by sand and crushed pieces of porcelain tiles were compared. At the end of filtrations, a complete analysis for detection of harmful chemical elements to human health was performed in water filtered by both filtering elements. The function of the analysis was to evince that the sand used on water filters can be replaced by crushed pieces of porcelain tile.

Keywords: broken ceramic pieces; reuse; filtering element.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCERAM	Associação Brasileira de Cerâmica
ANFACER	Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimento
CD	Coeficiente de desuniformidade
CEN	Comissão Européia de Normalização
D_{10}	Diâmetro efetivo
ETA	Estação de tratamento de água
FLA	Filtro de laboratório de areia
ICP-OES	Espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado
NTU	Unidade nefelométrica de turbidez
PET	Politereftalato de etileno
uT	Unidade de turbidez
ε	Porosidade
ψ	Esfericidade
ρ	Massa específica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
2 OBJETIVOS	21
2.1 OBJETIVO GERAL	21
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
3 ESTADO DA ARTE NA PRODUÇÃO DE PORCELANATO	23
3.1 DEFINIÇÃO DE PORCELANATO	23
3.1.1 Origem e classificação da cerâmica	23
3.1.2 Os porcelanatos	29
3.2 PANORAMA DA INDÚSTRIA DOS PORCELANATOS	34
3.3 O MEIO AMBIENTE E A PRODUÇÃO DE PORCELANATO ..	40
3.4 CHAMOTE: DEFINIÇÃO, GERAÇÃO E APLICAÇÕES	43
4 ELEMENTOS FILTRANTES PARA TRATAMENTO DE ÁGUA	45
4.1 TECNOLOGIAS PARA TRATAMENTO DE ÁGUA	45
4.2 FILTRAÇÃO	48
4.2.1 Mecanismos envolvidos na filtração	49
4.2.2 Classificação dos filtros	54
4.2.3 Os filtros e seus componentes	57
4.3 MEIOS FILTRANTES	66
4.3.1 Composição	66
4.3.2 Disposição no interior dos filtros	66
4.3.3 Características dos meios filtrantes	67
5 O PROBLEMA	75
6 MÉTODO EXPERIMENTAL	79
6.1 CARACTERIZAÇÃO DO CHAMOTE	79
6.1.1 Caracterização cerâmica	80
6.1.2 Caracterização como resíduo sólido	80
6.1.3 Caracterização como elemento filtrante	82
6.2 PREPARO DOS MEIOS FILTRANTES	82
6.2.1 Preparação do chamote de porcelanato	83
6.2.2 Preparação da areia	84
6.2.3 Definição das granulometrias de trabalho	84
6.2.4 Acondicionamento e manipulação do meio filtrante	86
6.3 FILTRAÇÃO EM LABORATÓRIO	87
6.3.1 Montagem do filtro de laboratório	87
6.3.2 Princípio de funcionamento do filtro	90
6.3.3 Definição dos parâmetros de filtração	91
6.3.4 Coleta, acondicionamento e caracterização da água bruta	93

6.3.5 Preparo e caracterização da água a filtrar.....	94
6.3.6 Filtração em laboratório	98
6.3.7 Coleta e caracterização das amostras de água filtrada	98
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO	101
7.1 METODOLOGIA DE TRATAMENTO DOS DADOS.....	101
7.2 RESULTADOS OBTIDOS	101
7.2.1 Resultados das caracterizações prévias do chamote	101
7.2.2 Resultados da coleta e preparação da água a filtrar	113
7.2.3 Resultados da eficiência de filtração.....	114
7.2.4 Qualidade final da água filtrada	145
8 CONCLUSÃO	149
REFERÊNCIAS.....	151
APÊNDICE.....	155

1 INTRODUÇÃO

Desde que começou a se impor perante as demais espécies vivas, a humanidade passou a subjugar a natureza, tal qual fosse sua escrava, tirando dela muito mais do que realmente precisava para viver. Ao longo dos séculos, o homem saiu da caverna, se modernizou e construiu uma sociedade cheia de conforto e comodidade a custa de extrações cada vez mais intensas de recursos naturais. Como se não bastasse, os processos produtivos criados pelo homem moderno, por não serem ideais, trouxeram a geração de volumes extraordinários de rejeitos – subprodutos dos processos principais. Por não ter onde empregar estes subprodutos, a humanidade passou a depositá-los na natureza sem critério algum que, durante anos a fio, suportou os abusos do homem sem nada fazer. Mas é chegada a hora do acerto de contas. É hora de todas as pessoas reverem suas práticas em relação ao meio ambiente, antes que seja tarde demais.

Com a indústria cerâmica e, em especial, a indústria de revestimentos cerâmicos não é diferente. Lodos, cinzas, gases do efeito estufa, água contaminada e quebra são alguns dos rejeitos gerados por este ramo de atividade. Dentre eles, as quebras queimadas merecem maior atenção. Ao contrário dos demais rejeitos, as quebras queimadas são difíceis de serem reaproveitadas no próprio processo, como é usual nas indústrias cerâmicas, especialmente se estas quebras forem de porcelanato, material cerâmico nobre e com dureza elevada.

Ainda há uma grande massa de empresas que, por não terem como reaproveitar suas quebras, continuam a depositá-las em aterros – o que não é ecologicamente correto. Por isso, este trabalho vem com intuito de mudar essa idéia, provando que há alternativas para o reuso das quebras. Assim, buscar-se-á dados e referências literárias que fomentem a empregabilidade do reuso da quebra queimada do porcelanato em outro ramo de atividade: o de tratamento de água, onde a quebra atuará como meio filtrante de impurezas em substituição da areia que tradicionalmente é empregada há anos com essa finalidade.

2 OBJETIVOS

Para fomentar a realização deste trabalho de pesquisa, definiram-se como objetivos:

2.1 OBJETIVO GERAL

Demonstrar a viabilidade da utilização de quebras queimadas britadas de revestimentos cerâmicos, em especial de porcelanato, como elemento filtrante para filtros de tratamento de água.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como outras metas, têm-se:

- a) agregar valor a um resíduo sólido cerâmico e evitar o seu descarte na natureza;
- b) desenvolver uma alternativa sustentável para obtenção de elementos filtrantes para o tratamento de água;
- c) reduzir custos para as empresas fabricantes de revestimentos cerâmicos.

3 ESTADO DA ARTE NA PRODUÇÃO DE PORCELANATO

3.1 DEFINIÇÃO DE PORCELANATO

3.1.1 Origem e classificação da cerâmica

Apresentando-se como um setor bastante amplo, a cerâmica engloba uma grande diversidade de materiais. Na visão de Modesto e Barbosa Jr (2001), o setor cerâmico compreende todos os produtos obtidos por meio de moldagem, secagem e queima de materiais argilosos ou de misturas que contenham tais materiais. A Associação Nacional de Fabricantes de Cerâmica para Revestimento, Anfacer (2012), destaca que a indústria cerâmica pode ser considerada como sendo a indústria de produção de artefatos a partir da argila, material que se torna extremamente moldável quando umedecida. Do ponto de vista da ciência dos materiais, os “cerâmicos são materiais inorgânicos que possuem ligações iônicas e/ou covalentes, como óxidos, silicatos” (RIELLA, 2010, p.63).

Embora se permita ao conhecimento humano definir a cerâmica dos mais distintos modos, não há dúvida de que esta se trata de uma das mais antigas atividades antrópicas. A Anfacer (2012) endossa este fato afirmando que os produtos cerâmicos estão entre os mais antigos materiais artificiais produzidos pelo homem, sendo frequentemente encontrados em escavações arqueológicas. Segundo Shreve e Brink Jr (1997), estudos arqueológicos revelaram louças feitas em barro queimado cuja idade ultrapassa quinze mil anos. Tão velho quanto o produto é a etimologia da sua nomenclatura. Segundo Modesto e Barbosa Jr (2001), a palavra “cerâmica” é proveniente do grego antigo “kéramos”, que pode ser traduzido como “coisa queimada”.

Do ponto de vista histórico e científico, o domínio da cerâmica foi fundamental à humanidade, pois permitiu o desenvolvimento da metalurgia, da siderurgia e da química (RIELLA, 2010). Segundo a Anfacer (2012), a História mostra que tão logo saiu das cavernas e começou a trabalhar como agricultor, o homem sentiu a necessidade de armazenar água, alimentos e sementes para a sua própria subsistência. Para que a estocagem fosse eficiente, os recipientes de armazenamento precisariam ser: resistentes ao uso; impermeáveis; e de fácil fabricação – características encontradas na argila queimada (ANFACER, 2012). Pouco a pouco, a produção de utensílios foi sendo aprimorada, de modo

que no Egito antigo as técnicas de fabricação estavam bem desenvolvidas (SHREVE; BRINK JR, 1997). Além dos egípcios, Riella (2010) demonstra que ao longo da História, vários povos ajudaram no desenvolvendo da cerâmica, dos quais se citam os gregos, os italianos, os ameríndios, os persas e os chineses. Porém, o progresso das técnicas de produção sempre ocorria em virtude de acidentes de queima, de experiências malsucedidas e de erros de mistura (RIELLA, 2010). A mudança deste cenário ocorreu somente após a Revolução Industrial, já nos séculos XVIII e XIX, quando uma vigorosa evolução no setor permitiu o desenvolvimento dos modernos processos de fabricação atualmente empregados (ANFACER, 2012).

Anos de estudo e desenvolvimento deram ao setor um tamanho imenso. Para a Associação Brasileira de Cerâmica, Abceram (2011), é necessário dividir o setor cerâmico em subsetores ou segmentos, haja vista sua amplidão e heterogeneidade. Segundo Modesto e Barbosa Jr (2001), tal classificação pode variar muito, pois múltiplos são os critérios passíveis de serem empregados. Para a Abceram (2011), os segmentos do setor cerâmico podem ser agrupados em função de diversos fatores como matérias-primas, propriedades e áreas de uso.

Como os critérios de classificação são bastante diversificados, é raro encontrar um modelo que seja unanimidade internacional. Neste sentido, um dos modos de categorização dos produtos cerâmicos mais bem aceitos mundialmente foi proposto pela Comissão Européia de Normalização (CEN), onde a classificação dos produtos é realizada conforme dois parâmetros: o tipo de conformação; e a capacidade de absorção de água (MODESTO; MENEGALLI, 2003). Assim, tem-se:

Tabela 1 – Classificação da cerâmica em função da absorção de água

Faixa de absorção de água	Tipo de conformação		
	Extrusão	Prensagem	Colagem
de 0 a 0,5%	AIa	BIa	CIa
de 0,5% a 3%	AIb	BIb	CIb
de 3% a 6%	AIIa	BIIa	CIIa
de 6% a 10%	AIIb	BIIb	CIIb
Maior que 10%	AIII	BIII	CIII

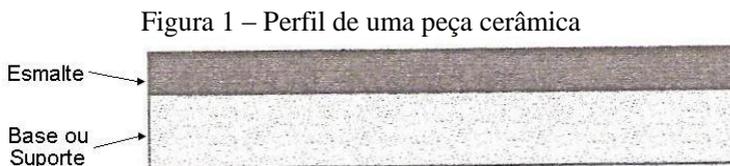
Fonte: Adaptado de Modesto e Menegalli (2003)

De acordo com a tabela, por exemplo, trata-se por “BIIb” os produtos conformados via prensagem que apresentem absorção de água entre 3 e 6%. Rosso, Cunha e Rojas-Ramírez (2005) comentam que esta é a classificação aceita pelas normas ISO 13006 e NBR 13818.

Outro modo de classificar os produtos cerâmicos é proposto pela Anfacer (2012), que sugere a subdivisão em setores, dos quais se citam:

- a) cerâmica vermelha;
- b) cerâmica branca;
- c) materiais refratários / isolantes térmicos;
- d) fritas e corantes;
- e) abrasivos;
- f) vidro, cimento e cal;
- g) cerâmica de alta tecnologia;
- h) pavimentos e revestimentos cerâmicos.

Dentre todas as categorias listadas, será dado maior enfoque ao setor de pavimentos e revestimentos cerâmicos, pois este é o campo de estudo deste trabalho. De acordo com Riella (2010), os pavimentos e revestimentos cerâmicos são compostos basicamente por uma mistura de argila, feldspato, caulim e quartzo, que são granulados e prensados. A prensa conforma o granulado de modo a gerar uma placa cerâmica, a qual recebe uma cobertura de um vidrado composto pela mistura entre um vidro moído e pigmentos (RIELLA, 2010). Já Modesto e Menegalli (2003) definem os pavimentos e revestimentos cerâmicos como sendo placas constituídas por uma base de natureza argilosa que pode ou não ser recoberta por uma camada de material vítreo, conforme demonstra a figura a seguir:



Fonte: Adaptado de Modesto e Barbosa Jr (2001)

Embora a definição dada por Modesto e Menegalli (2003) englobe conjuntamente revestimentos e pavimentos cerâmicos, os autores enfatizam que há diferenças entre ambos os produtos. Os revestimentos são produtos indicados para o recobrimento de paredes,

sendo normalmente porosos para facilitar sua aderência à alvenaria; já os pavimentos são indicados principalmente para o revestimento de chão devido à sua menor porosidade e melhores características técnicas se comparados aos revestimentos (MODESTO; MENEGALLI, 2003). A tabela a seguir, proposta por Riella (2010) com base na norma ISO 13006-6, exhibe os principais tipos de pavimentos e revestimentos cerâmicos comumente produzidos frente ao uso que lhes é recomendado:

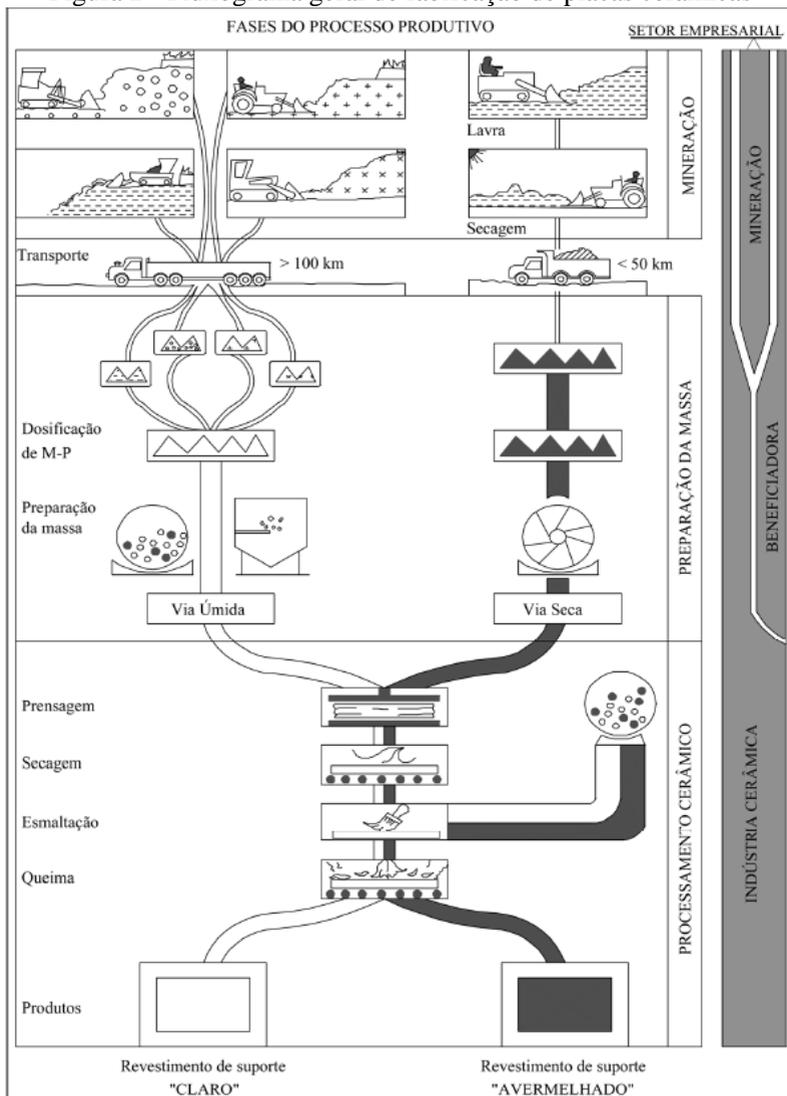
Tabela 2 – Classificação e uso recomendado dos revestimentos cerâmicos

Tipo de Produto	Uso Recomendado
Porcelanato	piso e parede
Grés	piso e parede
Semi-grés	piso e parede
Poroso	parede
Muito poroso	parede

Fonte: Riella (2010)

Evidentemente, as práticas de fabricação para pavimentos e revestimentos são distintas. “Dependendo do tipo das matérias-primas utilizadas e da tecnologia de produção, há diversos tipos de materiais cerâmicos com características distintas” (RIELLA, 2010, p.63). Ainda que apresentem particularidades distintas de fabricação, Modesto e Menegalli (2003) afirmam que as etapas do processo produtivo de ambos os produtos em questão são as mesmas: preparação de massa, conformação da peça, secagem, esmaltação e queima. A distinção entre as tipologias, no que tange a fabricação, se dá no manuseio das variáveis do processo e na dosagem das matérias-primas (MODESTO; BARBOSA JR, 2001). A seguir, demonstra-se um fluxograma básico do processo de fabricação de pavimentos e revestimentos cerâmicos:

Figura 2 - Fluxograma geral de fabricação de placas cerâmicas



Fonte: Zanardo, Motta e Cabral Jr (2001)

A primeira etapa do processo é a preparação de massa que, segundo Modesto e Menegalli (2003), pode ser definida como sendo o conjunto de operações realizadas com vistas a obter uma mistura

homogênea de matérias-primas em forma de pó, com granulometria adequada às características do processo produtivo, e que é comumente denominada como “massa cerâmica”. A base da preparação de massa é a moagem e mistura das matérias-primas (MODESTO; MENEGALLI, 2003). Riella (2010) comenta que o processamento das matérias-primas na preparação de massa pode-se dar a úmido ou a seco. Quando o processo é realizado a seco – explicam Modesto e Menegalli (2003) – cada matéria-prima é moída individualmente sem a presença de água. Uma vez granuladas, estas são dosadas a uma dada proporção, misturadas umas às outras, umidificadas e, por fim, armazenadas em silos (BRISTOT, 1996). Se o processo for realizado a úmido, então se faz necessário dosar água às matérias-primas antes de moê-las, de modo que ao final do processo se obtenha uma suspensão aquosa de argilo-minerais finamente moídos, denominada “barbotina”, que precisará ser desumidificada e granulada em um secador do tipo “spray-dryer” (MODESTO; MENEGALLI, 2003). Foust (1982) explica que, por meio de bombeamento, a suspensão em questão é pulverizada no interior do “spray-dryer” (ou atomizador, como também é denominado), onde as gotículas geradas entram em contato com o calor de maneira a provocar sua secagem instantânea, gerando assim um pó. Ao pó saído do atomizador dá-se o nome de pó atomizado ou pó cerâmico, que é recolhido e encaminhado a silos (MODESTO; MENEGALLI, 2003).

Dos silos, o material é encaminhado à etapa de conformação onde, de acordo com Modesto e Barbosa Jr (2001), será dada a forma ao produto. Bristot (1996) cita que normalmente a conformação é realizada em prensas hidráulicas. Nestes equipamentos, o pó é depositado sobre uma placa metálica, a qual se denomina “estampo”, que fica localizada no interior de um molde (MODESTO; MENEGALLI, 2003). Uma vez no interior deste conjunto, Modesto e Menegalli (2003) explicam que o pó é comprimido por uma superfície móvel (punção), de modo a deformar os seus grãos e moldá-los de acordo com o formato do molde.

Estando conformada, a peça cerâmica segue à etapa de secagem. Para Foust (1982), “secar” consiste em transferir uma substância líquida presente em um sólido para uma fase gasosa. Por meio de aquecimento, a secagem reduz a quantidade de água no interior da placa cerâmica, de modo a dar-lhe resistência suficiente para suportar os esforços do processo de esmaltação / decoração (MODESTO; MENEGALLI, 2003).

Segue, então, a operação de esmaltação, onde a peça seca recebe em sua superfície a aplicação de uma camada de esmalte, uma

suspensão de vidros, caulins, sílicas e pigmentos em água (MODESTO; MENEGALLI, 2003). De acordo com Shreve e Brink Jr (1997), esmalte (ou vidrado) é um revestimento fino de vidro que é aplicado sobre a superfície da peça cerâmica. Tem a finalidade de: impermeabilizar a base; facilitar a limpeza; embelezar; e aumentar a resistência química e mecânica da peça (MODESTO; MENEGALLI, 2003). Se for necessário decorar a peça com desenhos mais elaborados, então se recorre à serigrafia (BRISTOT, 1996).

Já decorada, a peça está pronta para entrar em fornos e assim iniciar o processo de queima. De acordo com Modesto e Menegalli (2003), a queima provoca uma série de transformações físicas e químicas que ocorrem apenas na presença de altas temperaturas e que dão aos materiais cerâmicos suas características técnicas. Além disso, a queima tem por função aumentar a densificação da peça, pois a alta temperatura provoca a liquefação dos componentes de menor temperatura de fusão que, por sua vez, escorrem aos espaços vazios da peça, preenchendo-os (MODESTO; BARBOSA JR, 2001). De acordo com Riella (2010), antigamente era comum queimar o produto duas vezes: uma vez antes e outra após a aplicação do vidrado, num processo conhecido como biqueima. Atualmente, devido os avanços tecnológicos, o suporte e o vidrado são queimados em uma única etapa, em um processo denominado monoqueima (RIELLA, 2010).

Modesto e Menegalli (2003) elucidam que terminada a queima é necessário avaliar as características técnicas do produto final frente a um determinado padrão de qualidade. Para Bristot (1996), essa atividade compõe mais um setor do processo, denominado de “classificação e embalagem”, onde as peças são inspecionadas e separadas por classes para posteriormente serem embaladas.

3.1.2 Os porcelanatos

Do ponto de vista produtivo, Cavalcante, Ferreira e Yadava (2008) comentam que a fabricação de placas para revestimento é um dos ramos mais dinâmicos da indústria cerâmica tradicional. Tal opinião é endossada por Vivona (2000), o qual salienta que a indústria cerâmica mundial tem apresentado desenvolvimento tecnológico bastante forte desde a década de 70. Dentre as muitas inovações ocorridas nos últimos anos, Heck (1996) enfatiza que a concepção do grés porcelanato, no final da década de 80, representou uma grande revolução para o setor.

Para Rodriguez et. al. (2004), o grés porcelanato é um material cerâmico diferenciado dos demais, caracterizado pelo seu processo de produção altamente tecnológico. Heck (1996) explica que tal produto foi desenvolvido para concorrer diretamente com as pedras naturais. Ainda seja visualmente semelhante, o grés porcelanato apresenta melhores propriedades do que as pedras naturais (HECK, 1996), sendo inclusive técnica e estaticamente superior às demais tipologias de cerâmica de revestimento (RIELLA, 2010).

Sob o ponto de vista da ciência dos materiais, Sánchez (2003) define o grés porcelanato (ou simplesmente porcelanato) como um revestimento cerâmico, esmaltado ou não, que tem como principal característica a impermeabilidade, já que não apresenta nenhuma ou quase nenhuma porosidade aparente. É importante salientar que há diferença entre os termos “grés” e “grés porcelanato”. Riella (2010) explica que “grés” é a denominação dada aos produtos com porosidade aberta que lhes confira absorção de água inferior a 3%. Já o “grés porcelanato” – explicam Rosso, Cunha e Rojas-Ramírez (2005) – compreende os pavimentos cerâmicos que se enquadram no grupo BIIa da classificação das normas ISO 13006 e NBR 13818:1997, isto é, todos os materiais conformados por prensagem que apresentem absorção de água menor ou igual a 0,5%. A tabela a seguir, proposta por Rosso, Cunha e Rojas-Ramírez (2005), localiza as principais tipologias de produtos na classificação empregada pelas normas ISO 13006 e NBR 13818:1997:

Tabela 3 – Tipologias de revestimentos cerâmicos

Tipologia	Absorção de água (%)	Grupo de Absorção
Porcelanato	Até 0,5	BIa
Grés	0,5 a 3,0	BIIb
Semi-grés	3,0 a 6,0	BIIa
Semi-porosa	de 6,0 a 10,0	BIIIb
Poroso	Acima de 10	BIII

Fonte: Rosso, Cunha e Rojas-Ramírez (2005)

Com a ajuda desta tabela, pode-se notar que o grés apenas será considerado como “porcelanato” se apresentar absorção de água inferior a 0,5%. Além da baixa absorção de água, espera-se que o porcelanato

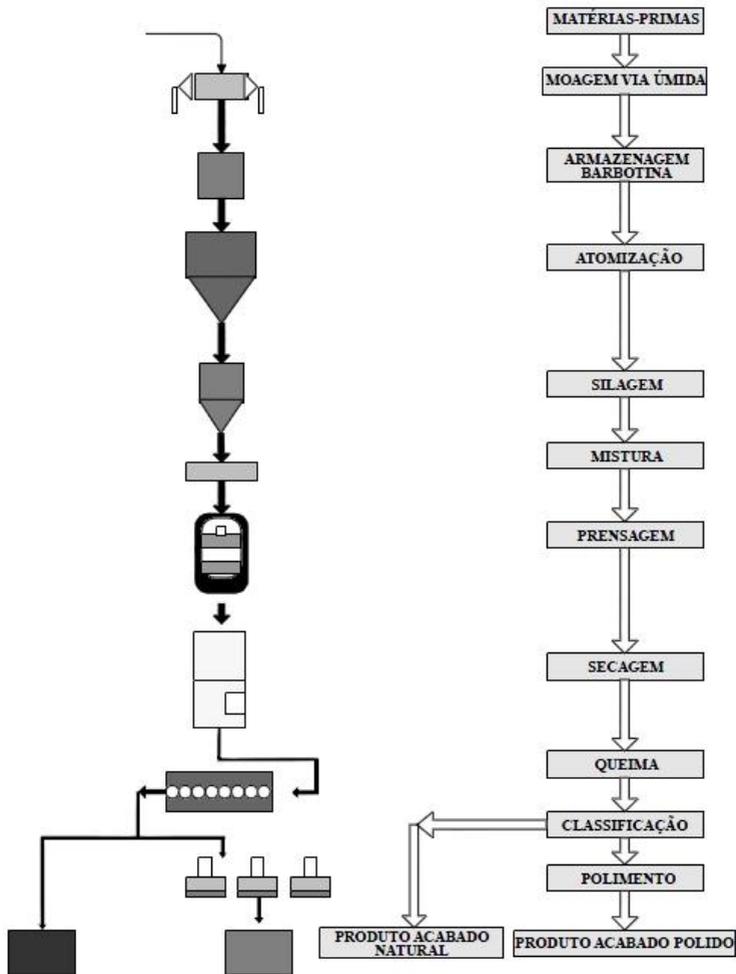
apresente alta resistência mecânica, ao risco e ao ataque químico (ROSSO; CUNHA; ROJAS-RAMÍREZ, 2005). Outras propriedades interessantes do porcelanato estão na sua uniformidade de cores, facilidade de manutenção e na sua altíssima resistência à abrasão e ao gelo (HECK, 1996). É importante salientar que “as características técnicas do porcelanato dependem grandemente do processo de fabricação” (ROSSO; CUNHA; ROJAS-RAMÍREZ, 2005).

Para Rosso, Cunha, Rojas-Ramírez (2005), o porcelanato pode ser classificado em esmaltado e técnico (podendo este ser polido ou não). Os mesmos autores explicam que porcelanato esmaltado deve apresentar absorção de água igual ou inferior a 0,5%, enquanto no porcelanato técnico esta deve ser menor ou igual a 0,1%. Riella (2010) complementa que esta classificação é definida de acordo com a norma ABNT NBR 15463. Sánchez (2003) comenta que usualmente emprega-se o termo “porcelanato técnico” para definir o porcelanato não esmaltado, do mesmo modo que o termo “porcelanato esmaltado” é empregado para definir o porcelanato que recebe uma cobertura de esmalte em sua superfície. Mas isso é uma terminologia incorreta, haja vista que “os termos são cunhados a partir de um ponto de vista puramente comercial, sem reflexão necessária ou rigor técnico, o que pode facilmente gerar confusões e, em última instância, má interpretação” (SÁNCHEZ, 2003, p.9).

Do ponto de vista produtivo, o processo de produção dos porcelanatos é altamente tecnológico (RIELLA, 2010). Essa visão é endossada por Sánchez (2003), que afirma que a manufatura, além de ser tecnologicamente desenvolvida, deve empregar matérias-primas de alta qualidade. A seleção da matéria-prima, segundo Heck (1996), é um ponto crucial e, por isso, Rosso, Cunha, Rojas-Ramírez (2005) alertam que é preciso realizar um rigoroso controle na sua pré-liberação.

No que tange a processo de fabricação, observa-se que quando se trata de porcelanato esmaltado o processo produtivo é praticamente o mesmo empregado aos produtos tradicionais. Por isso, Vivona (2000) explica que esta tem sido a opção de muitas empresas, já que não são necessários altos investimentos em maquinaria para efetuar a produção. De acordo com Heck (1996), isso não é válido para a produção de porcelanato técnico, realizada em um processo diferenciado, conforme se observa a seguir:

Figura 3 – Fluxograma produtivo: porcelanatos polidos e naturais



Fonte: Heck (1996)

Para Rosso, Cunha, Rojas-Ramírez (2005), a dosagem das matérias-primas marca o princípio do processo. Dosados os constituintes, segue-se à etapa de moagem / preparação de massa que, de acordo com Heck (1996), deve-se realizar por via úmida. Conforme recomendação de Modesto e Menegalli (2003), este tipo de moagem é indicado para pavimentos queimados rapidamente e na produção do grés

porcelanato. “A moagem é uma etapa crítica onde o controle sobre a granulometria deve ser mantido para garantia das condições de compactação e características do produto pós-queima” (HECK, 1996, p. 21). De acordo com Rosso, Cunha, Rojas-Ramírez (2005), se a moagem não for bem executada, poderá ocorrer o comprometimento das demais etapas do processo bem como das características do produto final. Modesto e Menegalli (2003) comentam que em caso de produção de massas coloridas, mói-se o corante junto com uma pequena quantidade de barbotina em moinhos pequenos, gerando assim uma suspensão concentrada de corante. Essa barbotina concentrada, ao findar seu preparo, deve ser diluída à barbotina moída sem adição de corante em tanques de grande volume (MODESTO; MENEGALLI, 2003). Terminada a moagem, a barbotina é descarregada do moinho, peneirada e armazenada em tanques aéreos, térreos ou subterrâneos (ROSSO; CUNHA; ROJAS-RAMÍREZ, 2005). Seguem-se, então, as etapas de atomização e silagem semelhantemente ao que ocorre no processo produtivo tradicional. Rosso, Cunha, Rojas-Ramírez (2005) elucidam que se o produto a ser produzido não for monocolor, é necessário realizar a dosagem e mistura dos pós coloridos por meio de balanças instaladas na saída dos silos. Do contrário, a fabricação segue conforme o processo tradicional de produção.

Dos silos, o pó segue para a prensagem, onde, de acordo com Heck (1996), se busca a conformação com a máxima redução da porosidade interna. Para tal, empregam-se pressões elevadas, da ordem de 400 a 500 kg/cm², com o objetivo de evitar defeitos de ortogonalidade e deformações no produto final (HECK, 1996).

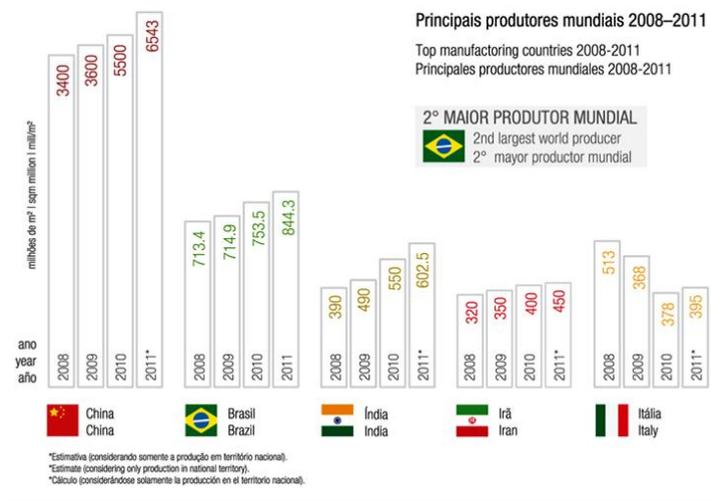
Como se pode observar no fluxograma proposto por Heck (1996), depois da secagem o produto segue diretamente à queima, sem passar pela esmaltação. No interior do forno, enfatizam Rosso, Cunha, Rojas-Ramírez (2005), a temperatura de queima deve proporcionar a máxima densificação. O produto queimado, conforme sugere Heck (1996), é classificado e, então, poderá ser embalado diretamente – constituindo deste modo o processo de fabricação do porcelanato natural ou não-polido – ou então seguir ao polimento. O polimento, de acordo com Heck (1996), é uma etapa inovadora no ramo cerâmico que visa dotar brilho à peça, característica muito procurada nos revestimentos devido à melhora estética e à facilidade de limpeza que proporciona ao produto. Rosso, Cunha, Rojas-Ramírez (2005) explicam que as peças são polidas por materiais abrasivos que giram em alta rotação na presença de água.

Heck (1996) complementa que após o polimento, as peças têm suas bordas retificadas de modo a deixá-las com tamanho idêntico – procedimento este que também pode ser aplicado ao porcelanato não-polido. Rosso, Cunha, Rojas-Ramírez (2005) mostram que o único inconveniente do polimento é que a operação abre alguns poros que estavam fechados na superfície da peça, o que, segundo Heck (1996), tende a diminuir a resistência a manchas. Isto justifica a forte busca que os fabricantes dessa gama de produtos têm empreendido pela redução da porosidade (ROSSO; CUNHA; ROJAS-RAMÍREZ, 2005).

3.2 PANORAMA DA INDÚSTRIA DOS PORCELANATOS

De acordo com os dados levantados pela Anfacer (2012), o Brasil é o segundo maior produtor de revestimentos cerâmicos do mundo, superando países tradicionais no setor como Itália e Espanha, e sendo superado apenas pela China, conforme se pode observar no gráfico:

Figura 4 – Principais produtores mundiais de revestimentos cerâmicos

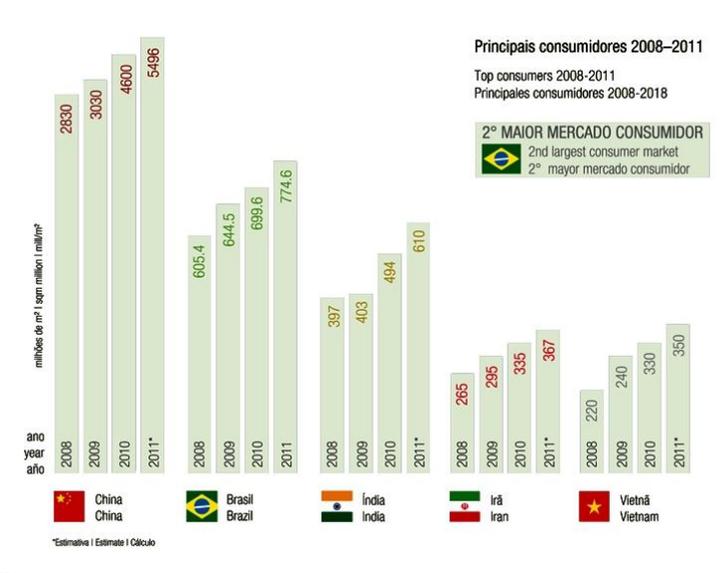


Fonte: ANFACER (2012)

Observa-se também que a produção brasileira tem crescido nos últimos anos. Para o ano de 2012, a Anfacer (2012) projeta que a produção nacional mantenha a tendência de crescimento observada nos últimos anos. A alta produção de revestimentos cerâmicos no Brasil é

puxada por uma crescente demanda, especialmente no mercado interno brasileiro. Isso faz do Brasil, o segundo maior consumidor mundial de revestimentos cerâmicos, novamente sendo superado apenas pela China. O desempenho dos mercados consumidores de revestimentos cerâmicos pode ser verificado no seguinte gráfico:

Figura 5 – Principais consumidores mundiais de revestimentos cerâmicos



Fonte: ANFACER (2012)

Com a tendência de crescimento no consumo em vista, espera-se que a produção acompanhe o mesmo ritmo. A Anfacer (2012) estima que a produção nacional de revestimentos cerâmicos atinja quase 900 milhões de metros quadrados em 2012. Detalhando um pouco melhor o gráfico anterior por um período maior de tempo e dando ênfase no mercado brasileiro, pode-se verificar que a maior parte do que é produzido no Brasil fica realmente no mercado nacional, fomentando assim o fato de que o mercado de consumo interno de pisos e azulejos está aquecido:

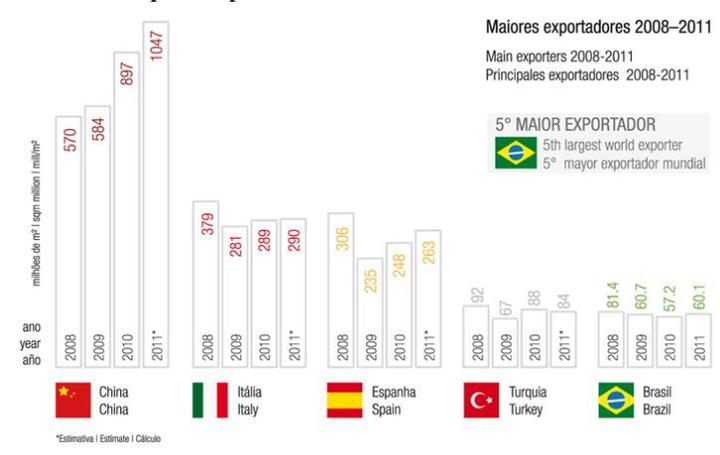
Figura 6 – Análise do mercado brasileiro de revestimentos cerâmicos



Fonte: ANFACER (2012)

Como é esperado, o alto consumo no mercado interno minimiza as exportações. Ainda de acordo com os dados levantados pela Anfacer (2012), o aquecimento no setor imobiliário nacional e o baixo valor do dólar no mercado internacional justificam a queda nas exportações brasileiras. Mesmo assim, o Brasil é o quinto maior exportador no setor:

Figura 7 – Principais exportadores mundiais de revestimentos cerâmicos



Fonte: ANFACER (2012)

O momento do mercado imobiliário é tão bom que este tem estimulado o aumento da capacidade produtiva brasileira, mesmo com a estagnação das exportações nos últimos anos. Por isso, a Anfacer (2012) estima que a capacidade produtiva brasileira ultrapasse a casa de um bilhão de metros quadrados em 2012, conforme se verifica no gráfico:

Figura 8 – Evolução da capacidade produtiva brasileira de revestimentos cerâmicos



Fonte: ANFACER (2012)

Quanto à tecnologia de produção, observa-se também que o setor produtivo de revestimentos cerâmicos no Brasil é predominantemente realizado por via seca:

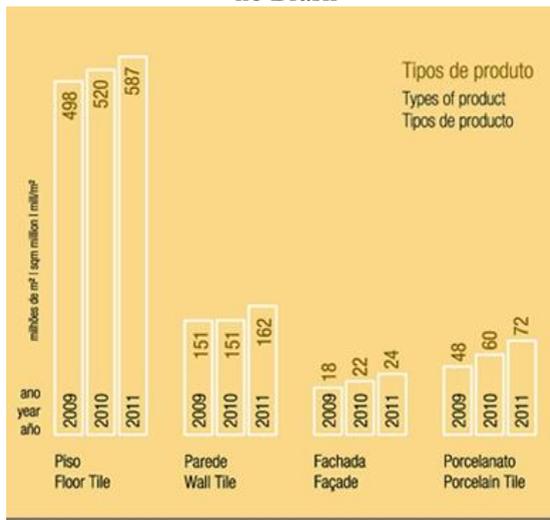
Figura 9 – Principais processos produtivos de revestimentos cerâmicos no Brasil



Fonte: ANFACER (2012)

Tratando, por fim, a respeito dos tipos de produto mais fabricados no Brasil, nota-se que os produtos para chão lideram a produção do setor, com forte tendência de crescimento. Eles são seguidos pelos produtos destinados à parede, pelos porcelanatos e pelos produtos para fachadas, respectivamente.

Figura 10 – Principais tipologias de revestimentos cerâmicos produzidas no Brasil



Fonte: ANFACER (2012)

Abordando mais profundamente os porcelanatos, pode-se notar nos dados levantados pela Anfacer (2012), que a produção desta tipologia de produto tem mostrado uma tendência ao crescimento nos últimos anos no Brasil. Tal crescimento não é observado apenas no Brasil. Vivona (2000) salienta que a indústria do grés porcelanato tem crescido e se desenvolvido muito nos últimos anos, especialmente na Itália. Menegazzo et. al. (2000) denotam que o porcelanato apresenta uma grande receptividade do mercado, o que gera um crescimento da demanda. Tal crescimento “deve-se ao alto valor agregado do produto e, especialmente, pelas novas possibilidades estéticas e de performance que criou um novo valor ao consumidor” (VIVONA, 2000, p.21).

O bom momento do mercado despertou o interesse das empresas nacionais. Porém, de acordo com Menegazzo et. al. (2000), o Brasil, de modo geral, não domina plenamente as tecnologias de produção de porcelanato. Vivona (2000) recorda que o aprimoramento dessa tipologia de produto só é conseguido com altos investimentos, principalmente no que diz respeito à produção do porcelanato não esmaltado. Vivona (2000) complementa ainda que tais investimentos são vitais à manutenção da posição mercadológica e à rentabilidade dos fabricantes de revestimentos porcelânicos. Por isso se tem observado um grande esforço das empresas nacionais na busca pelo domínio das técnicas de produção.

De acordo com Menegazzo et. al. (2000), a empresa brasileira com maior experiência na fabricação desse nicho de cerâmica no Brasil é a Eliane Revestimentos Cerâmicos, situada no Estado de Santa Catarina, onde a produção foi iniciada em 1996. Além da Eliane, Menegazzo et. al. (2000) cita que Cecriisa (MG), Ceusa (SC), Portobello (SC) e Elizabeth (PB) também tem se destacado na produção desta gama de produtos no país. Há ainda, segundo Menegazzo et. al. (2000), outras empresas nacionais que, por não dominarem as técnicas de produção, optam por importar porcelanatos de outros países para revendê-los no mercado brasileiro. Porém, quando o domínio da técnica não é pleno ou existem dificuldades financeiras, muitas empresas optam por produzir o porcelanato esmaltado. Vivona (2000) lembra que nos últimos anos o porcelanato esmaltado tem ganhado grande espaço no mercado, pois sua produção exige menores investimentos em tecnologia se comparados aos produtos não esmaltados – o que é uma opção atraente aos fabricantes que estão adentrando ao mundo dos porcelanatos.

Mercadologicamente, Menegazzo et. al. (2000) mostram que os maiores concorrentes dos porcelanatos ainda são as pedras naturais. Em nível comparativo, Menegazzo et. al. (2000) comentam que em 1999 no Brasil, a produção de pedras naturais foi cerca de 10 vezes maior que a produção porcelanato – o que faz da indústria da pedra um forte e expressivo adversário. Por isso, Vivona (2000) finaliza que a chave para o mercado na atualidade, não só para os porcelanatos, mas para o setor de revestimentos cerâmicos como um todo consiste em aperfeiçoar o conhecimento do mercado consumidor, definir uma boa estratégia organizacional e buscar a máxima eficiência produtiva.

3.3 O MEIO AMBIENTE E A PRODUÇÃO DE PORCELANATO

Casagrande et. al. (2008) comentam que a utilização de recursos naturais bem como a geração de resíduos são inerentes à atividade humana. Isso ocorreu durante anos sem maiores preocupações porque os recursos eram abundantes e a natureza conseguia assimilar passivamente os rejeitos gerados (MODESTO et. al., 2003). Contudo, Cavalcante, Ferreira e Yadava (2008) frisam que, quando feitas de modo indiscriminado, a extração de recursos naturais e o descarte de resíduos geram desequilíbrios ecológicos com consequências imprevisíveis. Não há dúvida que o meio ambiente vem sofrendo com os abusos da atividade humana, o que levam Cavalcante, Ferreira e Yadava (2008) a concluir que a degradação ambiental é um dos maiores problemas enfrentados pela humanidade nestas últimas décadas. Por isso, Casagrande, et. al. (2008) justificam que há uma crescente preocupação com a preservação do meio ambiente nos últimos anos, inclusive no Brasil. “O país, assim como todo o mundo moderno, encontra-se no momento de reorientar as estratégias desenvolvimentistas em direção ao crescimento econômico ecologicamente sustentado” (MODESTO et. al., 2003, p.15).

Neste novo contexto mundial, um dos maiores desafios é eliminar a geração dos resíduos (CAVALCANTE; FERREIRA; YADAVA, 2008). Quando não é possível reduzir ou evitar a geração de resíduos, Casagrande et. al. (2008) explicam que surge outro grande desafio: dar aos resíduos um destino ecologicamente correto.

Com o setor cerâmico não é diferente. Todavia, as indústrias cerâmicas têm a vantagem de que a maior parte de seus resíduos é sólida e apresentam facilidade de transformação. (MODESTO et. al., 2003). Por isso, Casagrande et. al. (2008) salientam que é comum às empresas cerâmicas utilizarem seus próprios resíduos em substituição a matérias-primas. Bernardin et. al. (2006) endossam que esta é uma opção atraente, tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico. Para exemplificar, Modesto et. al. (2003) comentam que em países como a Itália, a totalidade dos resíduos sólidos gerados é reempregada no processo produtivo. De acordo com Casagrande et. al. (2008), o objetivo é atingir a máxima eficiência com o mínimo custo, o que acaba por diminuir o uso de matérias-primas não renováveis.

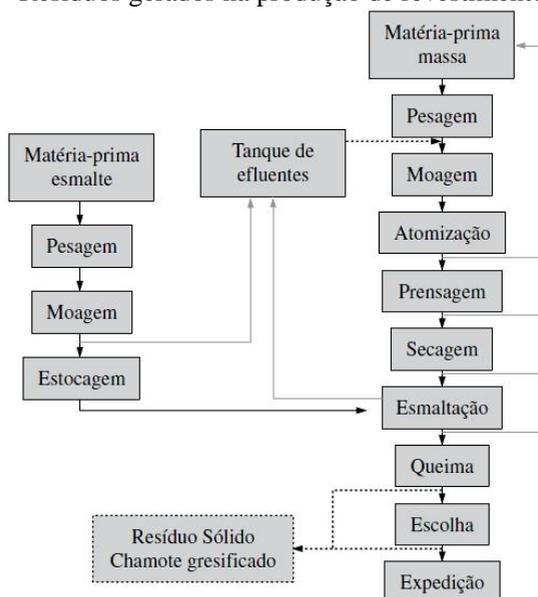
Focando-se com maior atenção nos resíduos industriais do processo de fabricação de revestimentos cerâmicos, Monfort e Enrique

(1996) explicam que tais resíduos podem ser classificados em vários nichos, de acordo com suas diferentes características. Assim, elencam quatro principais classes de resíduos (MONFORT; ENRIQUE, 1996):

- a) resíduos crus: restos de matérias-primas, aditivos e peças cruas;
- b) resíduos da depuração de gases;
- c) resíduos queimados: produtos acabados fora de especificação ou normas; e
- d) lamas provenientes do tratamento da água, geradas nas operações de limpeza, nas etapas de preparação e aplicação de esmaltes.

No fluxograma a seguir, podem-se observar os principais pontos de geração de resíduos da indústria de placas cerâmicas tradicional, bem como o destino que lhes pode ser dado no processo de fabricação:

Figura 11 – Resíduos gerados na produção de revestimentos cerâmicos



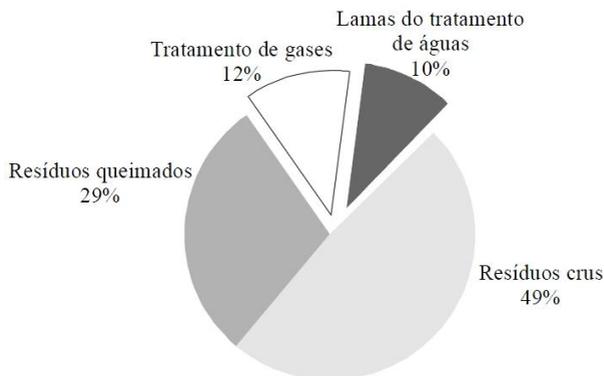
Fonte: Casagrande et. al. (2008)

Como complemento a este fluxograma, pode-se empregar a avaliação do setor realizada por Bernardin et. al. (2006), que citam alguns dos principais resíduos gerados pela indústria de placas

cerâmicas, como: peças quebras em virtude do processo ou de defeitos que apresentem; cinzas provenientes dos geradores de calor movidos a carvão mineral; rejeitos das valas de decantação de efluentes líquidos; e, no caso dos produtos polidos, sobras de abrasivos.

Em seus trabalhos, Monfort e Enrique (1996) quantificaram cada tipo de resíduo gerado pela indústria de revestimentos cerâmicos, de modo a obter o seguinte:

Figura 12 – Composição em peso dos resíduos gerados na produção de revestimentos



Fonte: Monfort e Enrique (1996)

Quando se trata especificamente de porcelanatos, pode-se deduzir – com base nas informações até então levantadas – que os esmaltados apresentam exatamente os mesmos resíduos dos processos tradicionais. Do mesmo modo, deduz-se a fabricação dos porcelanatos não esmaltados naturais e polidos apenas não apresenta os resíduos gerados pelo setor de esmaltação / decoração; os demais resíduos são observados assim como nos processos tradicionais. Os polidos, porém, geram também resíduos oriundos do seu polimento. Conforme exposto anteriormente por Rosso, Cunha, Rojas-Ramírez (2005), no processo do porcelanato polido, o polimento é feito por materiais abrasivos na presença de água – o que gera um lodo. Além disso, Bernardin et. al. (2006) lembram que também há a geração de sobras de pedras abrasivas, o que constitui um problema adicional à fabricação do porcelanato polido se o destino correto não for dado às mesmas.

3.4 CHAMOTE: DEFINIÇÃO, GERAÇÃO E APLICAÇÕES

Dentre todos os resíduos sólidos produzidos pelos fabricantes de revestimentos cerâmicos, um merece atenção especial: o chamote, o qual também é denominado como “quebra de escolha” por Casagrande et. al. (2008). Essa informação é reforçada por Modesto et. al. (2003), que o definem como sendo todo o produto cerâmico acabado que foi descartado por apresentar falhas. Campelo et. al. (2006), por sua vez, classificam como “chamote” todas as perdas de produto cerâmico queimado.

Casagrande et. al. (2008) mostram que a geração do chamote se dá após as etapas de queima e escolha do produto acabado. Transforma-se em “quebra de escolha” todo o produto acabado que apresentar alguma falha desqualificante (MODESTO et. al., 2003). Para Lourenço Filho (1976), os defeitos ou falhas são a ausência de conformidade de um produto a certas especificações. No universo das placas cerâmicas, os defeitos em questão são muitos, de forma que Martín (2004) os separou em quatro categorias:

- a) dimensionais: caracterizados por deformidades nas dimensões das peças;
- b) estruturais: defeitos ocorridos no suporte da peça;
- c) superficiais: defeitos ocorridos na superfície da peça;
- d) de aparecimento diferente: trincas tardias e eflorescências.

Independentemente do tipo falha ocorrida, Modesto et. al. (2003) revelam que o descarte de produto (e conseqüentemente a geração de chamote) representa, em média, 3,0% de toda a produção nacional de revestimentos cerâmicos.

Além do alto volume de geração e das perdas financeiras, a produção de chamote apresenta outro grande problema: a sua disposição final. Avaliando os demais resíduos sólidos da indústria cerâmica pela ótica de Modesto et. al. (2003), nota-se que as cinzas geradas da queima do carvão mineral nos geradores de calor podem ser empregadas pela indústria cimenteira; as quebras não queimadas oriundas das etapas de modelagem, secagem e esmaltação podem ser retroalimentadas na própria etapa de moagem do revestimento cerâmico. Mas o chamote, de acordo com Casagrande et. al. (2008), quase sempre é descartado. É por isso que Modesto et. al. (2003) afirmam que os rejeitos gerados após a etapa de queima são o maior problema das empresas cerâmicas na atualidade.

Evidentemente, alguns trabalhos visando o reaproveitamento desse material já foram desenvolvidos, afinal, segundo afirmam Cavalcante, Ferreira e Yadava (2008), o reemprego de resíduos representa um grande potencial de redução de custos de produção. Assim como ocorre à maioria dos subprodutos cerâmicos, a prática mais comum de reaproveitamento consiste na retroalimentação do chamote no próprio processo produtivo, na etapa de preparação de massa, onde este entra em substituição a certas matérias-primas (CAVALCANTE; FERREIRA; YADAVA, 2008). Conforme mostram os estudos empreendidos por Modesto e Barbosa Jr (2001), o chamote é fonte de material inerte. Quando empregado na composição da massa cerâmica, o chamote aumenta a permeabilidade do suporte e facilita a eliminação dos gases produzidos pela volatilização da matéria orgânica no interior da peça durante a etapa de queima (MODESTO; BARBOSA JR, 2001). Embora esta solução seja relativamente comum no dia-a-dia das indústrias de revestimentos cerâmicos, a retroalimentação deve ser ministrada com cautela. Segundo Modesto et. al. (2003), por ser muito duro, o chamote tende a dificultar a operação de moagem, o que eleva em muito os custos de processamento. Ao levar este fato em conta, muitos fabricantes optam por depositar sua “quebra de escolha” em aterros – prática condenada por Bernardin et. al. (2006), já que a deposição desordenada de resíduos em aterros pode promover a contaminação do solo, dos lençóis freáticos, dos rios, dos lagos, bem como o surgimento de doenças, a redução dos recursos naturais não renováveis, e a alteração do ciclo biológico da vegetação.

Além do reaproveitamento no próprio processo de fabricação de revestimentos, encontram-se na literatura muitos trabalhos de reuso do chamote em outros ramos de atividade, a maior parte em cerâmica vermelha. Para citar alguns destes trabalhos, lembram-se os estudos de Campelo et. al (2006); Casagrande et. al. (2008); Cavalcante, Ferreira e Yadava (2008); Ripoli Filho (1997); e Vieira, Souza, Monteiro (2004).

No caso do porcelanato, a preocupação com o chamote é ainda maior, já que suas características superiores dificultam o seu reemprego na moagem. Por isso, é de vital importância que novas utilidades para este subproduto sejam encontradas. É exatamente isto que este trabalho de pesquisa vem propor.

4 ELEMENTOS FILTRANTES PARA TRATAMENTO DE ÁGUA

4.1 TECNOLOGIAS PARA TRATAMENTO DE ÁGUA

É notória a importância do tratamento de água para a saúde humana. A veiculação de doenças transmitida via hídrica durante séculos a fio motivou uma série de estudos, os quais buscavam desenvolver técnicas de tratamento que fossem eficazes na eliminação de agentes patogênicos. De fato, tais pesquisas alcançaram sua meta, de modo que atualmente muitas são as tecnologias de tratamento de água.

Embora o modo de tratar a água para consumo seja bastante diversificado, percebe-se que todas as tecnologias de tratamento englobam basicamente as mesmas etapas básicas. A mais tradicional é conhecida como “tratamento completo” (LEME, 1979), sendo assim denominada porque grande parte das tecnologias de tratamento, em maior ou menor grau, descende desta. Segundo Leme (1979), o “tratamento completo” é composto das seguintes etapas: mistura, floculação, decantação, filtração e desinfecção / fluoretação. Desta maneira, o que diferencia o “tratamento completo” das tecnologias dele derivadas são os parâmetros operacionais empregados, bem como a ausência de uma ou mais etapas.

A quanto à seleção das tecnologias a ser empregada, Richter e Azevedo Netto (1995) elucidam que o tratamento adequado será selecionado com base na qualidade da água bruta. Apenas para exemplificar, águas brutas com baixa cor e turbidez podem ser filtradas diretamente, sem a necessidade de passar pelas demais etapas do “tratamento completo” (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 1995).

Por ser o mais abrangente, a seguir explicam-se passo a passo as etapas do tratamento dado à água pela tecnologia “completa”:

a) mistura

Richter e Azevedo Netto (1995) chamam esta etapa não apenas de mistura, mas de “mistura rápida”. Di Bernardo, Di Bernardo e Centurione Filho (2002) glosam que nesta etapa um sal de alumínio ou ferro é adicionado à água bruta a fim de coagulá-la, de modo a induzir a agregação das impurezas em flocos. Richter e Azevedo Netto (1995) completam afirmando que a dosagem do produto químico deve ser feita através da determinação do potencial zeta das partículas suspensas no líquido. Modesto e Barbosa Jr (2001) definem o potencial zeta como

sendo um fenômeno eletro-cinético que ocorre pela interação do sistema água/sólido suspenso. Esses mesmos autores afirmam que um aumento no valor do potencial zeta indica um aumento das forças repulsivas entre as partículas, ao passo que uma diminuição indica um aumento das forças atrativas entre as partículas – sendo almejado este último no caso específico do tratamento de água. Ainda segundo Di Bernardo, Di Bernardo e Centurione Filho (2002), a mistura dos agentes coagulantes na água pode ser dada por agitação mecânica (agitadores) ou hidráulica (pela própria turbulência do escoamento da água). Ao final desta etapa, a água com o coagulante é encaminhada à etapa de floculação.

b) floculação

Para Di Bernardo, Di Bernardo e Centurione Filho (2002), a etapa de floculação consiste em submeter a água misturada ao agente coagulante à agitação lenta, para que as impurezas possam se agregar em flocos. Assim como ocorre na etapa de mistura rápida, a agitação pode ser mecânica ou hidráulica (DI BERNARDO; DI BERNARDO; CENTURIONE FILHO, 2002). Quando os flocos alcançam tamanho e massa específica suficientes para possibilitar a sua remoção por sedimentação, então, é hora de repassar a água aos decantadores. (DI BERNARDO; DI BERNARDO; CENTURIONE FILHO, 2002).

c) sedimentação

Na visão de Foust (1982), a sedimentação é um processo de separação sólido-líquido que ocorre em suspensões diluídas devido à ação da gravidade terrestre sobre os sólidos suspensos. Di Bernardo, Di Bernardo e Centurione Filho (2002) explicam que a sedimentação pode feita em decantadores convencionais (grandes tanques com o escoamento vertical ou horizontal sem qualquer agitação) ou em decantadores de alta taxa (idêntico aos primeiros, porém posicionam-se, ao fundo destes, placas planas paralelas ou módulos de plástico que aumentam a área de decantação). Daqui, a água segue para filtração.

d) filtração

A filtração é feita pela passagem da água através de filtros recheados com materiais granulares (DI BERNARDO; DI BERNARDO; CENTURIONE FILHO, 2002). Seu objetivo é realizar a “separação de um sólido de um fluido que o carrega” (FOUST, 1982, p. 579). No caso específico do tratamento de água, visa-se separar os

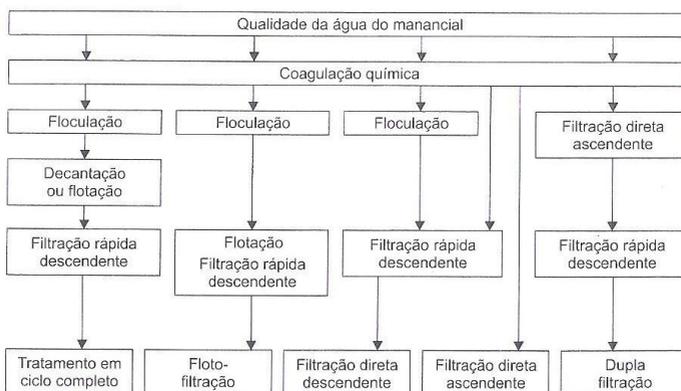
flocos remanescentes da sedimentação do seio aquoso. Di Bernardo, Di Bernardo e Centurione Filho (2002) também comentam que o fluxo de água no interior dos filtros é, em grande parte das aplicações, descendente. A água, agora livre de impureza, pode finalmente ser desinfectada.

e) desinfecção

A água clarificada que sai dos filtros segue para a etapa de desinfecção, onde será eliminada a maior parte dos microrganismos patogênicos (DI BERNARDO; DI BERNARDO; CENTURIONE FILHO, 2002). Para a realização de tal tarefa, Di Bernardo, Di Bernardo e Centurione Filho (2002) aconselham o uso de produtos químicos, como o cloro, dióxido de cloro, ozônio, peróxido de hidrogênio ou até mesmo a radiação ultravioleta. Destes, o ozônio é o mais eficiente e, se combinado com peróxido de hidrogênio, seu poder de desinfecção torna-se ainda maior (DI BERNARDO; DI BERNARDO; CENTURIONE FILHO, 2002). Ao fim desta etapa, a água está pronta para consumo humano.

É importante ressaltar que este é o método clássico de tratamento de água, do qual se originaram a maior parte das demais metodologias de tratamento. Em seu trabalho, Di Bernardo, Di Bernardo e Centurione Filho (2002) conseguiram resumir boa parte das metodologias que empregam água quimicamente coagulada em um único fluxograma:

Figura 13 – Principais tecnologias de tratamento de água



Fonte: Di Bernardo, Di Bernardo e Centurione Filho (2002)

Além desses processos, Libânio (2008) cita a existência de uma metodologia de tratamento que emprega filtros de baixa taxa, conhecidos como filtros lentos, onde a etapa de coagulação (e conseqüentemente as etapa de floculação e sedimentação) é dispensável. Porém, o emprego desse método é limitado ao tratamento de águas brutas de baixa cor verdadeira, pouca turbidez e baixa concentração de algas (LIBÂNIO, 2008).

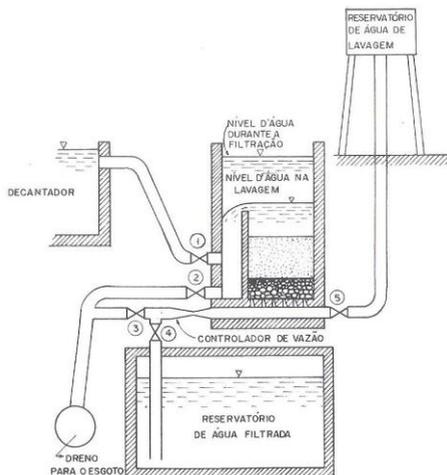
4.2 FILTRAÇÃO

A filtração é parte importantíssima deste trabalho de pesquisa. O novo emprego do subproduto cerâmico queimado ao qual esta pesquisa se dispõe a estudar está diretamente ligado à etapa de filtração – fato que justifica a especial atenção que esta merece.

Ritcher (1995) define a filtração como um processo de separação sólido-líquido. Quando aplicada ao tratamento de água, Libânio (2008) comenta que a função da filtração é retirar impurezas responsáveis por dar cor e turbidez à água. Já Di Bernardo, Di Bernardo e Centurione Filho (2002) complementam expondo que a filtração busca remover partículas suspensas, partículas coloidais e microorganismos presentes na água por meio da passagem do líquido através de um meio granular. Conforme explica Libânio (2008), a remoção de tais partículas do seio da água é de suma importância, pois elas reduzem a eficácia da etapa de desinfecção, onde os microorganismos patogênicos devem ser eliminados.

Para Leme (1979), a filtração possui grande importância na purificação da água para consumo humano. Di Bernardo (1993) endossa essa opinião afirmando que a filtração é a principal etapa do tratamento e, por isso, é a maior responsável pela qualidade final da água tratada. Por sua vez, Libânio (2008) exprime que a filtração é responsável por corrigir as possíveis falhas ocorridas nas etapas anteriores do tratamento e assim garantir a qualidade da água – o que justifica a sua importância. Na ilustração a seguir, Leme (1979) exhibe uma estação clássica de filtração de água:

Figura 14 – Estação de filtração de água para consumo humano



Fonte: Leme (1979)

De acordo com Di Bernardo (1993), a filtração envolve diversos mecanismos de retenção de impurezas, que são bastante difíceis de serem manipulados matematicamente. Ritcher (1995) explica que todas as variáveis envolvidas na filtração precisam ser manuseadas de modo que a qualidade da água seja garantida. “O conhecimento dos efeitos produzidos no filtro pela água que é filtrada através do leito filtrante é de grande importância para a determinação das variáveis que interferem no processo e das medidas de controle da filtração” (LEME, 1979, p. 172). Haja vista a dificuldade e complexidade do tratamento matemático da filtração, Di Bernardo (1993) sugere que a teoria seja combinada com experimentos práticos que, de fato, demonstrem quais são as melhores condições a serem empregadas como base no projeto e operação de filtros de tratamento de água. Tais experimentos práticos devem ser baseados em observações feitas nos filtros (Leme, 1979). Estes mecanismos, pois, são tratados na seção a seguir.

4.2.1 Mecanismos envolvidos na filtração

Di Bernardo (1993) comenta que durante muito tempo, pensou-se que os filtros funcionassem apenas como coadores, ou seja, estes reteriam apenas as partículas com diâmetro maior do que os vazios

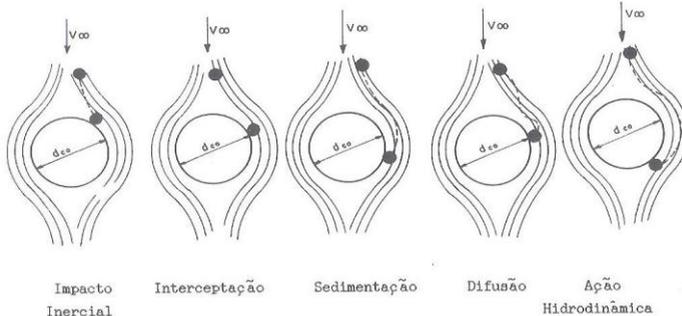
intergranulares do meio filtrante. Na prática, porém, observava-se que o meio filtrante era capaz de reter partículas muito menores do que o diâmetro de seus espaços vazios (DI BERNARDO, 1993). O próprio Di Bernardo (1993) explica que isso ocorre porque há mais fenômenos envolvidos do que simplesmente a ação física de coar.

De acordo com Richter e Azevedo Netto (1995), o mecanismo de filtração envolve fenômenos físicos, químicos e, por vezes, biológicos. Libânio (2008) prefere separar os mecanismos em dois: de transporte; e de aderência. Os mecanismos de transporte são compostos por fenômenos físicos e hidráulicos relacionados aos mecanismos de transferência de massa; já os mecanismos de aderência são compostos basicamente por fenômenos químicos (LIBÂNIO, 2008).

4.2.1.1 Mecanismos de Transporte

Segundo Di Bernardo (1993), os mecanismos de transporte são aqueles que explicam a aproximação das partículas dispersas na água aos grãos do material filtrante. Para Libânio (2008), esses mecanismos são influenciados principalmente pela temperatura da água (que interfere na viscosidade e na laminaridade do escoamento), pelas peculiaridades do meio filtrante e pela taxa de filtração. De acordo com Di Bernardo (1993), os mecanismos mais comumente aceitos estão expressos na ilustração a seguir:

Figura 15 – Mecanismos de transporte da filtração



Fonte: Di Bernardo (1993)

Na seqüência, estes mecanismos são explicados em linhas gerais:

a) impacto inercial

Di Bernardo (1993) revela que as correntes de fluido mudam de direção para contornar os grãos do meio filtrante. Nesse momento, conforme explana Libânio (2008), as partículas com grande quantidade de movimento tendem a manter a sua trajetória por ação da inércia, vindo a colidir no grão do elemento filtrante, onde acabam por ficar retidas.

b) interceptação

De acordo com Libânio (2008), a corrente de fluido, bem como as partículas nela presente, precisam tangenciar o grão do meio filtrante. Quando a corrente tangencia o grão a uma distância menor do que a metade do diâmetro das partículas suspensas, ocorre então a interceptação (DI BERNARDO, 1993). Libânio (2008) comenta que assim que a partícula suspensa roça a superfície do grão do leito de filtragem, há uma perda de velocidade que acaba por provocar a deposição da mesma sobre o meio filtrante.

c) sedimentação

Para Di Bernardo (1993), este mecanismo é caracterizado pelo efeito da gravidade sobre as partículas suspensas que, por sua vez, tendem a sedimentar sobre o meio filtrante. Libânio (2008) explana que o escoamento do fluido no interior de um filtro é realizado em regime laminar, onde as correntes de fluido são paralelas devido às forças viscosas. Segundo Di Bernardo (1993), nessas condições a velocidade tangencial de escoamento (responsável por movimentar a partícula) decai rapidamente à medida que se aproxima da superfície do grão filtrante. A queda brusca de velocidade, de acordo com Libânio (2008), pode induzir as partículas maiores e de maior massa específica a desviarem-se da trajetória da corrente, de modo a depositarem-se sobre o grão do elemento filtrante.

d) difusão

Partículas pequenas costumam apresentar movimento errático quando suspensas em correntes de fluidos, devido ao bombardeio das moléculas de água à sua superfície (DI BERNARDO, 1993). De acordo com Libânio (2008), esse movimento difusivo aleatório é chamado de movimento browniano. Devido a este movimento, as partículas podem se desviar da corrente de fluido e terminarem por se depositar sobre os

grãos do elemento filtrante, onde as velocidades intersticiais são menores (LIBÂNIO, 2008).

e) ação hidrodinâmica

Di Bernardo (1993) comenta que este é o principal mecanismo que rege a remoção das partículas grandes. Libânio (2008) explica que ao tangenciar o grão de elemento filtrante, a corrente de fluido apresenta um gradiente de velocidade tangencial, provocando uma diferença de pressão na direção perpendicular ao escoamento. Essa diferença de pressão cria uma força que impele a partícula suspensa para a superfície do elemento filtrante de forma a retê-la (LIBÂNIO, 2008).

Di Bernardo (1993) salienta que é provável que todos os mecanismos elucidados atuem simultaneamente. Para Libânio (2008) a predominância de um ou outro mecanismo se dará em função das propriedades do afluente, da tecnologia de tratamento empregada e das condições de operação da estação de tratamento. Mesmo tendo em vista essa observação, Di Bernardo (1993) ressalta que os mecanismos de sedimentação, interceptação e difusão são os mais relevantes.

4.2.1.2 Mecanismos de Aderência

Para Di Bernardo (1993), os mecanismos de aderência são aqueles responsáveis por capturar as partículas suspensas e aderi-las aos grãos do meio filtrante. Libânio (2008) cita três principais mecanismos de aderência: forças de van der Waals; forças eletrostáticas; e pontes químicas. Di Bernardo (1993), por sua vez, considera que há interações entre as forças eletrostáticas e de Van der Waals e, por isso, considera ambas como sendo um só mecanismo. Assim, segundo Di Bernardo (1993), tem-se como mecanismos de aderência:

a) interação combinada entre forças eletrostáticas e as de Van der Waals

De acordo com Sardella (1997), as forças de Van der Waals são forças intermoleculares de fraca intensidade capazes de provocar interações de natureza elétrica (atração) tanto em moléculas polares (dipolo-dipolo) quanto em apolares (dipolo instantâneo-dipolo induzido). Aplicadas à filtração, “essas forças constituem-se sempre de forças de atração, podendo existir entre partículas de mesma carga,

neutras ou de cargas opostas, sendo, porém, seu campo de ação limitado a distâncias muito curtas” (LIBÂNIO, 2008, p. 285). De acordo com Libânio (2008) essas forças são influenciadas pela dimensão e pela densidade das partículas, mas independem do pH do meio. No que tange às forças eletrostáticas, segundo Di Bernardo (1993), quando imersos em água, os grãos do meio filtrante tendem a apresentar cargas negativas em sua superfície. Já as partículas em suspensão, conforme apresenta Libânio (2008), podem ter cargas elétricas variadas, o que gera forças de atração e repulsão entre si. Deste mesmo modo, as partículas positivas em suspensão podem ser atraídas para a superfície negativa do meio filtrante, onde terminam por aderir à superfície dos grãos que compõe o leito de filtração por meio de forças eletrostáticas (LIBÂNIO, 2008). Libânio (2008) lembra que é comum à maior parte das plantas de tratamento de água a adição de floculantes nas etapas anteriores à filtração. Essa prática ajuda a formar colóides positivos de partículas suspensas, o que favorece a atuação do mecanismo em questão (LIBÂNIO, 2008). Di Bernardo (1993), porém, ressalta que este mecanismo é influenciado pelo pH da suspensão. Avaliando as interações existentes entre os mecanismos de forças de Van der Waals e forças eletrostáticas sob a ótica de Libânio (2008), observa-se que podem ocorrer três situações: 1) as partículas suspensas de carga neutra adsorverão ao meio filtrante por meio de forças de Van der Waals; 2) as partículas suspensas de carga positiva adsorverão ao meio filtrante pela união entre as forças de Van der Waals e as eletrostáticas – sendo esta a situação ideal de trabalho; e 3) as partículas suspensas de carga negativa provocarão repulsão entre si e entre elas e o meio filtrante – constituindo assim a situação mais desfavorável. Libânio (2008) lembra que neste último caso, embora represente o cenário mais desfavorável à adsorção, a repulsão entre as partículas pode provocar a aproximação delas ao meio filtrante, fator este que favorece a atuação de forças de Van der Waals.

b) pontes químicas (ou interação química)

Conforme apresenta Di Bernardo (1993), neste mecanismo se encontram todas as interações responsáveis por promover a ligação química entre partícula e meio filtrante, das quais ganham destaque: as ligações de hidrogênio, a troca iônica e a adsorção mútua. A adsorção mútua é a mais importante delas (DI BERNARDO, 1993). Libânio (2008) mostra que auxiliares químicos de filtração, como alguns

compostos orgânicos com sítios ionizáveis, podem ajudar na aderência e na ligação química entre partícula e meio filtrante. Segundo Di Bernardo (1993), a adição de polímeros e sais de alumínio ou ferro durante a lavagem dos filtros aumenta a eficiência de filtração no início da operação, pois os grãos do elemento filtrante são recobertos pelo aditivo químico que ajudam a formar cadeias (pontes químicas) que prendem as partículas suspensas.

Conhecendo-se os mecanismos que regem a remoção de partículas contaminantes, pode-se passar a abordar os equipamentos responsáveis pela execução propriamente dita da filtração: os filtros.

4.2.2 Classificação dos filtros

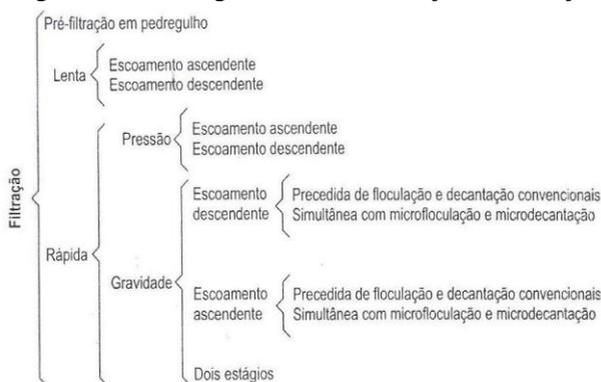
De acordo com Leme (1979), a filtração é uma operação que ocorre em equipamentos denominados filtros. Libânio (2008) afirma que há muitos tipos de filtros que podem ser usados no tratamento de água, mas não existe uma classificação abrangente destes na literatura técnica especializada. Por isso, variadas são as formas de classificá-los. Leme (1979) propõe que os filtros sejam categorizados de acordo com: o tipo de material filtrante; a disposição do material do meio filtrante nos leitos; o sentido de escoamento do fluido a ser filtrado; a taxa ou velocidade de filtração; a pressão existente. A seguir, apresentam-se as principais classes de filtros, de acordo com os critérios propostos por Leme (1979):

- a) segundo o tipo de material filtrante: filtros de areia; filtros de carvão ou antracito; filtros de carvão-areia; filtros de carvão e areia granada; filtros de terra diatomácea;
- b) segundo a disposição do material do meio filtrante nos leitos: filtros com leito em camadas superpostas de areia com granulometrias diferentes; filtros com leito em camadas superpostas de areia e carvão, com granulometrias diferentes; filtros com leito em camadas de areia, carvão e granada com granulometrias diferentes; filtros com leito de carvão e areia-granada misturados;
- c) segundo o sentido de escoamento do fluido a ser filtrado: filtros de escoamento descendente; filtros de escoamento ascendente; filtros de escoamento nos dois sentidos;

- d) segundo a taxa ou velocidade de filtração: filtros lentos; filtros rápidos; filtros de taxas elevadas;
- e) segundo a pressão existente: filtros de pressão ou com a superfície sob pressão; filtros de gravidade ou com a superfície livre.

Embora seja bastante completa e abrangente, a categorização recomendada por Leme (1979) não é muito habitual. Na prática, é usual classificarem-se os diversos modelos de filtros existentes de acordo com suas características de funcionamento. Neste sentido, Libânio (2008) sugere categorizá-los empregando apenas dois critérios: em primeiro plano a taxa de filtração e, secundariamente, o sentido do escoamento, conforme ilustra a imagem a seguir:

Figura 16 – Fluxograma de classificação da filtração



Fonte: Libânio (2008)

Conforme se pode observar na figura anterior, Libânio (2008) resume a categorização dos filtros em três classes: os pré-filtros, os filtros lentos, e os filtros rápidos. Tais classes são detalhadas a seguir.

Para iniciar, abordam-se os pré-filtros. Segundo Libânio (2008), os pré-filtros são equipamentos construtivamente semelhantes aos filtros convencionais. São usualmente empregados antes dos filtros lentos de modo a facilitar a sua operação (LIBÂNIO, 2008). Huisman e Wood (1974) recomendam o uso do pré-filtro especialmente quando a filtração lenta for escolhida para o tratamento de águas de elevada turbidez. Como sua função é melhorar as características da água a ser tratada pelos filtros tradicionais, os pré-filtros utilizam meio filtrante de

granulometria mais grosseira do que a normalmente usada pelos demais sistemas de filtração (LIBÂNIO, 2008).

Quanto aos filtros lentos e rápidos, a diferenciação entre um e outro está apenas na velocidade de filtração. “Quando a velocidade com que a água atravessa o leito filtrante é baixa, o filtro é denominado filtro lento. Quando é elevada, é denominado filtro rápido” (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 1995, p. 195). Dentre ambos, os filtros rápidos são os mais empregados na atualidade (LIBÂNIO, 2008). Nestes filtros, o meio filtrante mais utilizado é a areia, a qual é acondicionada no interior do equipamento sobre camadas de cascalho (LEME, 1979). Segundo Libânio (2008), o fluxo de água nos interior destes filtros pode transcorrer de modo descendente ou ascendente. Independentemente do fluxo de escoamento da água durante a filtração, Leme (1979) salienta que os filtros rápidos demandam paradas periódicas para limpeza do leito filtrante com água limpa.

Já quanto aos filtros lentos, Huisman e Wood (1974) explicam que estes utilizam apenas uma fina camada de areia como elemento filtrante, que pode trabalhar durante semanas – e até meses – sem necessitar de limpeza. Bastante eficientes, os filtros lentos são reconhecidos pela sua capacidade de remoção de contaminantes, eliminando inclusive agentes patogênicos (BRITO et. al., 2005). De acordo com Libânio (2008), os filtros lentos dispensam a etapa de coagulação necessária à operação dos filtros rápidos e que é responsável pela adição de muitos produtos químicos na água. Libânio (2008) complementa ainda que o escoamento da água no interior destes filtros pode se dar de modo descendente ou ascendente. Os filtros lentos descendentes são indicados para “águas de baixa cor verdadeira, turbidez e concentração de algas” (LIBÂNIO, 2008, p.309). Huisman e Wood (1974) comentam que estes filtros são também conhecidos como “filtros biológicos”, pois na superfície de seu meio filtrante costuma se formar uma película de microorganismos (denominada “schmutzdecke”) que ajuda na remoção de impurezas. Os filtros lentos ascendentes, por sua vez, são os filtros menos difundidos no meio técnico, haja vista que ainda não há certeza sobre a formação da “schmutzdecke” no seu interior – fato que os tornam desinteressantes. (LIBÂNIO, 2008).

Além do que fora apresentado até então, há outros modos de categorizar as unidades de filtração. Richter e Azevedo Netto (1995) preferem classificar a filtração em direta – quando não há a etapa de decantação antes da filtração – e indireta. Já Di Bernardo (1993) sugere

categorizar os sistemas de filtração quanto à taxa de operação. À luz do critério defendido por Di Bernardo (1993), as unidades de filtração podem ser classificadas em filtros com taxa constante, quando o nível de água sobrenadante ao leito de filtragem é constante, e filtros com taxa declinante, onde há variações no nível de fluido no interior do filtro.

4.2.3 Os filtros e seus componentes

Os filtros são equipamentos capazes de realizar a separação sólido-líquido por meio da “passagem forçada do fluido através de uma membrana porosa” (FOUST, 1982, p. 579). Segundo Foust (1982), durante a passagem do fluido pelo filtro, o fluido consegue permear o meio filtrante, mas as partículas sólidas não, ficando retidas nos poros da membrana. De acordo com Leme (1979), os sólidos mais comuns presentes no seio da água a filtrar são: sílica, argilas, colóides e microrganismos, como vírus, bactérias e algas.

Segundo Libânio (2008), todos os filtros para o tratamento de água operam com sólidos granulares como meio filtrante. Foust (1982) expõem que este é o tipo mais simples de filtro industrial, sendo indicado para o tratamento de grandes volumes de suspensões muito diluídas. Operacionalmente, a filtração neste tipo de equipamento pode dar por ação da gravidade ou pela incidência de pressão (FOUST, 1982). Como se pode imaginar, há diferenças construtivas entre ambos os modos operacionais.

4.2.3.1 Filtros de Gravidade

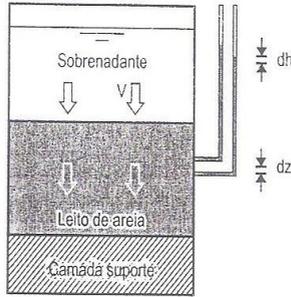
São equipamentos operados sob a ação da força da gravidade. Quanto ao fluxo de água no interior do equipamento, os filtros de gravidade, na concepção de Leme (1979), podem ser classificados como: descendentes, ascendentes ou duplo estágio (escoamento em ambos os sentidos). Há diferenças construtivas entre estes filtros e, por isso, eles serão tratados em particular.

a) filtros descendentes

Nestes filtros, a altura da coluna água criará pressão sobre o leito filtrante, de modo que a diferença entre a pressão da coluna de fluido e a perda de carga do meio filtrante consiste na força motriz que promoverá o escoamento do fluido no interior do filtro (LIBÂNIO, 2008). Assim,

conforme se nota na imagem a seguir, a água entra na unidade de filtração pela parte superior e sai filtrada pela parte inferior:

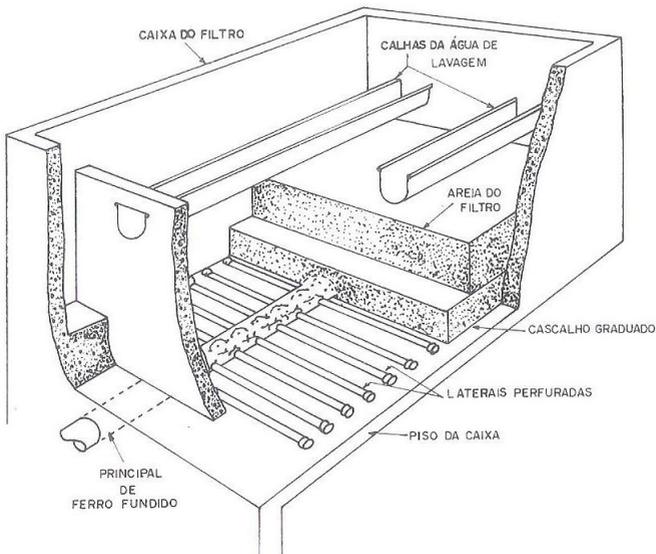
Figura 17 – Esquema de funcionamento de um filtro descendente



Fonte: Libânio (2008)

Outro croqui, de autoria de Leme (1979), ajuda a entender melhor a estrutura de um filtro de gravidade descendente:

Figura 18 – Vista em corte de um filtro descendente

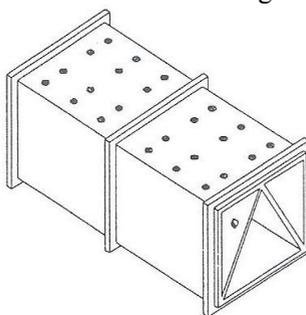


Fonte: Leme (1979)

Por meio destas ilustrações, observam-se alguns componentes dos filtros de gravidade descendentes, dentre os quais Libânio (2008) destaca: o sistema de drenagem, a camada-suporte e as calhas de limpeza. Estes dispositivos são abordados na sequência.

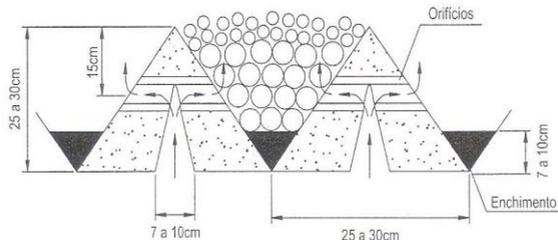
Segundo Leme (1979), a função do sistema de drenagem é servir de sustentação ao leito filtrante. Libânio (2008) também atribui ao sistema de drenagem as funções de recolher a água já tratada e auxiliar na distribuição de água de lavagem durante a limpeza do filtro. Por isso, estes equipamentos localizam-se na parte inferior dos filtros (LEME, 1979). Libânio (2008) comenta que existem muitos modelos de sistemas de drenagem, dentre os quais os mais usados no Brasil são: os blocos cerâmicos ou plásticos; os tubos e vigas perfuradas; e o fundo falso com bocais. Conforme explica Di Bernardo (2003), os blocos cerâmicos ou plásticos também são conhecidos como “blocos tipo Leopold”.

Figura 19 – Bloco do sistema de drenagem do tipo “Leopold”



Fonte: Libânio (2008)

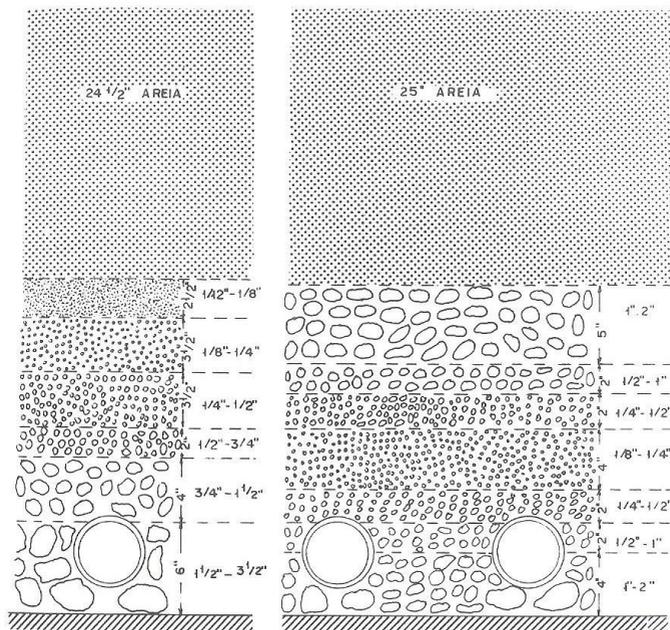
Figura 20 – Sistema de drenagem de vigas perfuradas tipo californianas



Fonte: Libânio (2008)

A camada suporte, por sua vez, é geralmente constituída de cinco camadas de pedregulho (RICHTER; AZEVEDO NETTO, 1995). Sua função é “evitar que os grãos do meio filtrante passem através dos orifícios dos dispositivos de coleta de água filtrada (e também de água de lavagem) e sejam arrastados com efluente” (LIBÂNIO, 2008, p. 332). Para Libânio (2008), a camada suporte também auxilia na distribuição da água de lavagem. Segundo Leme (1979), as camadas devem ser alocadas no interior do filtro de forma gradual de acordo com sua granulometria. Deste modo, a camada mais grossa é depositada no fundo do filtro enquanto a mais fina é depositada logo abaixo do meio filtrante (LEME, 1979). Di Bernardo (1993) explica que isso é necessário para se evitar desarranjos nas camadas superiores.

Figura 21 – Dois leitos quaisquer assentados sobre a camada-suporte

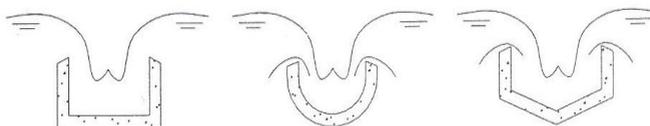


Fonte: Leme (1979)

Finalmente, têm-se as calhas de coleta de água de lavagem. De tempos em tempos, o filtro precisa parar para ser lavado. Richter e Azevedo Netto (1995) demonstram que há dois critérios que ajudam a

decidir o momento exato de parada para limpeza do filtro: quando a água sobrenadante atinge certo nível (o que indica que o filtro está entupido); ou quando a água filtrada apresenta sensível aumento de turbidez. Uma vez parado o filtro, Di Bernardo (1993) comenta que a lavagem deve usar água filtrada no sentido ascensional com força suficiente para expandir e fluidificar o meio filtrante e, assim, liberar as impurezas nele retidas. Por isso, é necessário instalar calhas na porção superior do filtro. “A água resultante de lavagem é coletada por meio de calhas e escoada para um canal conectado a um dreno de esgoto” (LEME, 1979, p. 350).

Figura 22 – Admissão de água em diferentes tipos de calha de lavagem

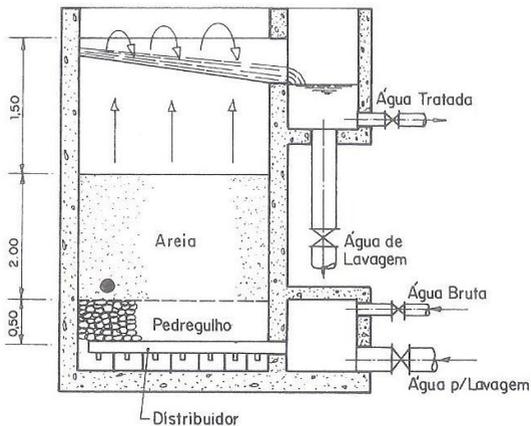


Fonte: Libânio (2008)

b) filtros ascendentes

Segundo Libânio (2008), estes filtros surgiram no século XVII, mas tornaram-se populares após a Segunda Guerra Mundial nos países do leste europeu, em especial na antiga União Soviética – motivo pelo qual, passaram a ser conhecidos como “filtros russos”. Para Leme (1979), os filtros ascendentes diferenciam-se dos descendentes por apresentar sentido de escoamento inverso ao usual, onde a água entra pelo fundo do filtro e permeia o recheio da camada com granulometria maior para a de granulometria menor (de baixo para cima). Di Bernardo (2003) explica que o escoamento da água no sentido dos grãos mais grossos para os mais finos aproxima este método de filtração do método ideal. E isso possibilita que apenas um material seja usado como meio filtrante (LEME, 1979). Porém, Richter e Azevedo Netto (1995) recomendam estes tipos de filtro apenas para águas brutas com baixa turbidez e carga mineral. As ilustrações que segue demonstram bem o funcionamento de um “filtro russo”:

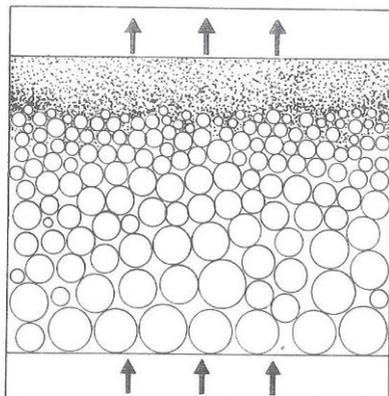
Figura 23 – Filtro ascendente



Fonte: Richter e Azevedo Netto (1995)

Em outro desenho esquemático pode-se observar a fluência do líquido entre a distribuição de grãos em um filtro ascendente:

Figura 24 – Esquema de funcionamento de um filtro ascendente



Fonte: Leme (1979)

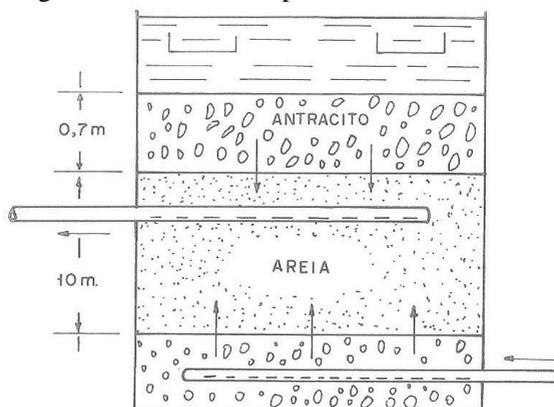
Construtivamente, Di Bernardo (2003) explica que os filtros ascendentes são construídos da mesma forma que os filtros descendentes. Operacionalmente, porém, há duas diferenças entre ambos que vale ressaltar. A primeira diz respeito à camada suporte.

Segundo Libânio (2008), a camada suporte dos filtros ascendentes ajuda a reter partículas, ao contrário do que ocorre nos filtros descendentes, onde esta meramente serve como sustentação para o leito filtrante. A segunda distinção refere-se à lavagem do filtro. De acordo Richter e Azevedo Netto (1995), a lavagem dos filtros ascendentes deve ser realizada no mesmo sentido do escoamento da água a tratar, ou seja, também em fluxo ascendente, porém com velocidade suficiente alta para fluidificar o meio filtrante e assim permitir o arrasto das sujidades.

c) filtros de duplo sentido de escoamento

O filtro de duplo sentido de escoamento consiste na associação entre o filtro ascendente com o descendente (DI BERNARDO; DI BERNARDO; CENTURIONE FILHO, 2002). Leme (1979) comenta que este tipo de filtro é comum na Holanda e na Rússia. O seguinte croqui exemplifica este tipo de filtro:

Figura 25 – Filtro de duplo sentido modelo AKX



Fonte: Leme (1979)

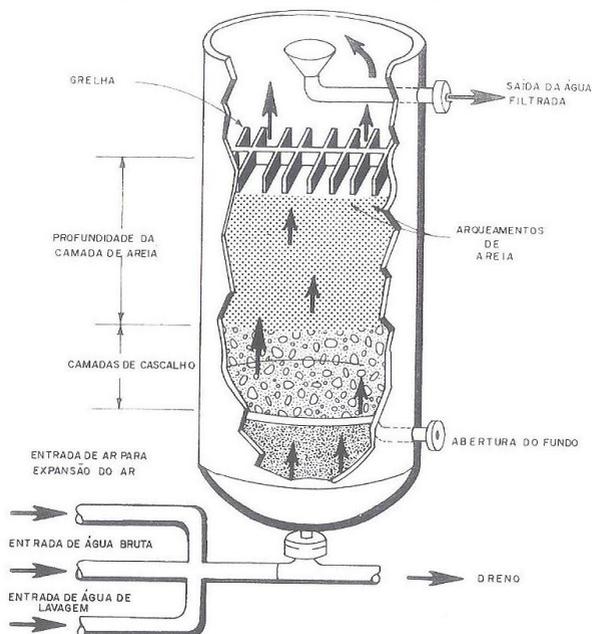
Conforme demonstrado por Leme (1979), nestes filtros há entrada de água bruta em ambos os sentidos e a saída ocorre por meio de um encanamento localizado na parte central do equipamento. Como meio filtrante, os filtros de duplo sentido de escoamento empregam unicamente areia (DI BERNARDO; DI BERNARDO; CENTURIONE FILHO, 2002). Segundo Leme (1979), estes filtros também são dotados de calhas superiores para recolhimento da água de limpeza. Sua

principal vantagem é evitar o arrasto do meio filtrante pela água, além de apresentar um melhor desempenho quanto à perda de carga no leito de filtração (LEME, 1979).

4.2.3.2 Filtros de Pressão

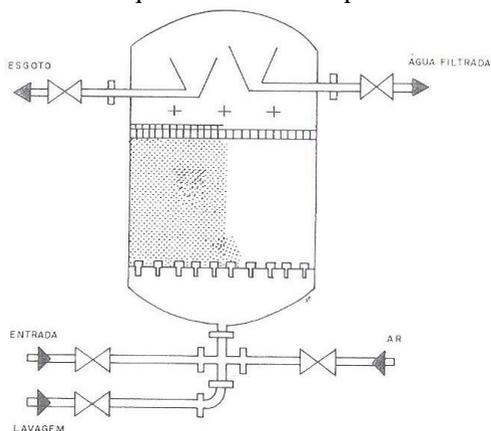
Libânio (2008) classifica “filtros de pressão” como unidades filtrantes compostas de cilindros fechados, posicionados na vertical ou na horizontal, onde a água a filtrar é mantida artificialmente sob pressão. Por trabalhar com pressão, Leme (1979) explica que normalmente estes filtros são construídos principalmente em aço, embora haja versões construídas em concreto. São indicados para águas de cor e turbidez baixas (LIBÂNIO, 2008). Os croquis a seguir mostram filtros de pressão:

Figura 26 – Croqui em corte de um filtro de pressão ascendente



Fonte: Leme (1979)

Figura 27 – Croqui de um filtro de pressão ascendente



Fonte: Leme (1979)

Embora as figuras anteriores mostrem filtros de pressão de fluxo ascendente, Libânio (2008) salienta que estes podem ser operados em ambos os sentidos. Construtivamente, a única diferença entre os filtros de pressão ascendentes e descendentes está na grelha de fixação do leito, é indispensável ao primeiro. Assim, quando operados em fluxo ascendente, os filtros de pressão apresentam uma grelha que impede o carregamento do meio filtrante pela água (LEME, 1979).

Quanto ao meio filtrante e a camada suporte, Libânio (2008) expõe que os filtros de pressão apresentam granulometria semelhante à dos filtros de gravidade. A lavagem sempre ocorre com escoamento ascendente quando a perda de carga atinge valores elevados (LIBÂNIO, 2008). Leme (1979) sugere o uso de ar comprimido para movimentação da camada filtrante durante a lavagem, especialmente quando o leito é imobilizado pela grelha. A água de lavagem é recolhida por uma calha na parte superior do equipamento (LEME, 1979).

Por fim, na visão de Libânio (2008), a principal vantagem do uso deste tipo de filtro está na sua rápida montagem (já que é pré-fabricado), no seu espaço reduzido, e na possibilidade de movimentação (pode ser desmontado e montado em outro local). Em contrapartida, por ser totalmente fechado, o filtro de pressão impede a avaliação visual da operação de filtração, assim como impossibilita o acompanhamento da

limpeza do leito filtrante – o que faz desta gama de filtros uma opção pouco empregada na prática (LIBÂNIO, 2008).

4.3 MEIOS FILTRANTES

O meio filtrante é o principal componente da unidade de filtração, pois é dele a função de efetivamente reter as impurezas a água (DI BERNARDO; DI BERNARDO; CENTURIONE FILHO, 2002). Dada sua grande importância, destina-se ao estudo dos meios filtrantes esta seção, a qual se propõe melhor abordá-los.

4.3.1 Composição

O meio filtrante pode ser obtido de variados materiais. Di Bernardo (2003) cita que há pesquisas que empregam como meio filtrante casca de coco, plásticos, carvões e zeólitas. Usualmente, segundo Di Bernardo (1993), os principais meios filtrantes usados são a areia e o antracito. Estes, conforme já tratado anteriormente, devem ser assentados sobre um leito de cascalho, pedregulho ou seixos rolados denominado camada-suporte (LIBÂNIO, 2008). “A areia deve ser constituída de grãos essencialmente de quartzo, resultantes da degradação ou decomposição de rochas que contêm em torno de 99% de sílica” (DI BERNARDO, 1993, p. 66). Além disso, Di Bernardo (1993) recomenda que a massa específica da areia esteja entre 2,5 e 2,7 t/m³ e salienta que a solubilidade desta em ácido clorídrico concentrado (1,18 g/cm³) não deve exceder 5%. Já quanto ao antracito, ou carvão antracitoso, Di Bernardo (1993) apenas recomenda que o mesmo tenha dureza superior a 2,5 na escala Mohs.

4.3.2 Disposição no interior dos filtros

A disposição dos meios filtrantes no interior dos filtros pode se dar em uma única camada ou em camada dupla (DI BERNARDO, 1993).

No Brasil, segundo Libânio (2008), os filtros de camada simples são constituídos apenas por uma camada de areia, enquanto os de camada dupla empregam areia e antracito. Richter e Azevedo Netto (1995) comentam que nos filtros de camada dupla, é prudente assentar a camada de antracito sobre a de areia. Di Bernardo (1993), por sua vez,

mostra que a aplicação em dupla camada promove um aumento da taxa de filtração – e por isso, estes filtros são denominados “filtros de alta taxa”.

Há também filtros de camada tripla, que empregam além da areia e do antracito uma camada de granada ou ilmenita (LIBÂNIO, 2008). Nestes sistemas de filtração, Di Bernardo (1993) recomenda depositar a granada sobre a areia. Porém, o mesmo autor ressalta que os filtros de camada tripla são incomuns no tratamento de água para consumo.

4.3.3 Características dos meios filtrantes

“As características dos materiais que compõem um leito filtrante, devem ser objeto de uma definição racional, por sua influência no rendimento dos filtros” (RITCHER; AZEVEDO NETTO, 1995, p.242). Para Libânio (2008) as principais características dos meios filtrantes são o tamanho e a distribuição dos grãos. “O conhecimento das características granulométricas dos materiais granulares que compõem o meio filtrante é imprescindível para que se possa projetar um sistema de filtração” (DI BERNARDO, 2003, p. 32). Segundo Leme (1979), além da granulometria, a espessura do leito de filtragem também deve ser usada como parâmetro de seleção do meio filtrante.

O tamanho e a distribuição dos grãos, de acordo com Libânio (2008), são obtidos através de um ensaio granulométrico. Di Bernardo (2003), por sua vez, explica este ensaio é realizado com peneiras de vários tamanhos de abertura. Existem, no mercado, vários modos de nomear as peneiras em função da abertura de suas malhas. Dentre estes, de acordo com Di Bernardo (1993), a série americana e a série Tyler constituem os dois modos mais empregados, sendo que cada qual apresenta critérios próprios de denominação das aberturas. As aberturas de malha mais comuns destas séries são elencadas na tabela a seguir:

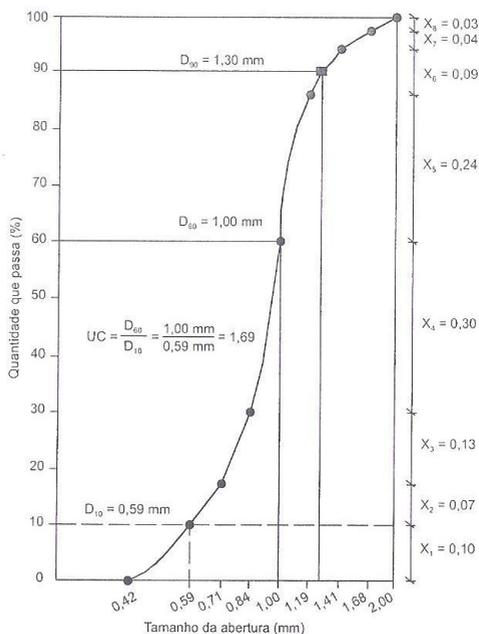
Tabela 4 – Peneiras usadas em ensaios granulométricos

Série Americana		Série de Tyler	
Número	Abertura malha (mm)	Número	Abertura malha (mm)
3 ¼	5,66	3	6,68
4	4,76	4	4,76
5	4	6	3,36
6	3,36	8	2,36
7	2,8	10	1,65
8	2,36	14	1,168
10	2	20	0,84
12	1,68	28	0,59
14	1,41	35	0,42
16	1,18	48	0,42
18	1	65	0,208
20	0,84	100	0,147
25	0,71	150	0,104
30	0,6	200	0,0074
35	0,5		
40	0,42		
45	0,335		
50	0,3		
60	0,25		
70	0,212		
80	0,18		
100	0,15		
200	0,074		
270	0,053		
400	0,037		

Fonte: Di Bernardo (2003)

Após selecionar as peneiras mais convenientes, Di Bernardo (2003) sugere coletar aproximadamente 1000g de material a ser ensaiado e peneirá-lo mecânica ou manualmente. O peneiramento é realizado da peneira de maior abertura para a de menor abertura, de modo que ao final do ensaio, deve-se pesar a quantidade de material retido em cada uma das malhas (DI BERNARDO, 1993). “Evidentemente, a quantidade retida em uma peneira imediatamente abaixo de outra superior, passou por esta de maior abertura” (DI BERNARDO, 1993, p.60). Com os materiais pesados, Di Bernardo (2003) recomenda que sejam calculados os percentuais retidos em cada malha, de modo acumulativo. Os resultados são plotados em uma curva, onde na abcissa plota-se a abertura da malha em escala logarítmica, frente o percentual de material passante, conforme o exemplo a seguir (DI BERNARDO, 1993):

Figura 28 – Curva de distribuição granulométrica de um meio filtrante



Fonte: Di Bernardo (2003)

Libânio (2008) sugere procedimento semelhante, porém recomenda que o tamanho dos grãos seja plotado em dimensões reais e não em logarítmicas. De qualquer modo, essa curva permite a definição de maior parte das características dos meios filtrantes, conforme expressa Di Bernardo (2003). E esses parâmetros devem ser analisados no todo, nunca de forma independente (DI BERNARDO, 1993).

Além das características obtidas através da curva de distribuição granulométrica, há outras propriedades dos meios filtrantes que necessitam ser estudadas. Dentre todas estas, Di Bernardo (2003) elenca as seguintes: tamanho dos grãos; tamanho efetivo; coeficiente de desuniformidade; forma e geometria dos grãos; porosidade; massa específica; solubilidade em ácido clorídrico; e solubilidade em hidróxido de sódio. Estas são abordadas de forma particular a seguir.

a) tamanho dos grãos (máximo e mínimo):

Di Bernardo (1993) comenta que a definição do maior e do menor tamanho de grão devem ser os primeiros parâmetros a serem definidos. Já Di Bernardo (2003) mostra que a escolha da granulometria do meio filtrante depende da tecnologia a ser empregada, além de outras variáveis como: taxa de filtração, carga hidráulica disponível, qualidade do afluente, qualidade requerida do efluente, sistema de lavagem e espessura da camada filtrante. Por isso, Richter e Azevedo Netto (1995) recomendam que a escolha da melhor granulometria deva ser realizada com base em testes em estações-piloto de filtração.

b) tamanho efetivo (D_{10}):

O tamanho efetivo é o “diâmetro da peneira que deixa passar 10% em peso de uma amostra de grãos” (LIBÂNIO, 2008). Pode ser obtido na curva de distribuição granulométrica do meio filtrante.

c) coeficiente de desuniformidade (CD):

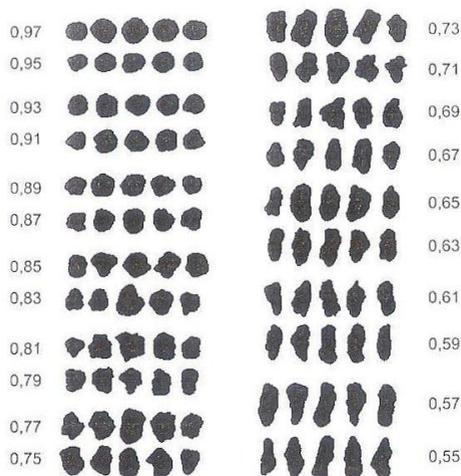
Libânio (2008) define o coeficiente de desuniformidade como sendo o quociente entre o diâmetro da peneira em que passa 60% da amostra em peso e o tamanho efetivo (D_{10}). Di Bernardo (1993) esclarece que este parâmetro é muito importante, pois a penetração de impurezas no meio filtrante está intimamente ligada a este coeficiente – quanto menor CD, mais uniforme é o meio e mais profundamente as impurezas penetram.

d) forma e geometria dos grãos:

Di Bernardo (2003) afirma que a perda de carga no meio, a velocidade de fluidificação e a expansão do leito durante a lavagem são diretamente influenciadas pela forma e geometria dos grãos. Grãos de formas irregulares apresentam melhor desempenho de filtração, segundo Di Bernardo (1993), ao passo que grãos com formas esferoidais facilitam a lavagem do meio e proporcionam menor perda de carga. A caracterização dos grãos, de acordo com Di Bernardo (2003), é dada pelo coeficiente de esfericidade e pelo diâmetro volumétrico médio.

O coeficiente de esfericidade é definido por Libânio (2008) como sendo a relação entre a área superficial de uma esfera e de um grão que possuam o mesmo volume. Di Bernardo (1993), por sua vez, sugere dois modos para se calcular a esfericidade: por comparação visual, ou por ensaio em coluna de sedimentação. A comparação visual é mais rápida, prática e, por isso, mais usada. Segundo Di Bernardo (2003), esta técnica consiste em comparar a forma dos grãos a serem empregados no leito de filtração com as formas expostas na ilustração a seguir. Encontrando-se na ilustração a forma que mais se assemelha à forma do grão real, basta verificar o valor anotado ao lado da forma escolhida no croqui. Este valor é o coeficiente de esfericidade.

Figura 29 – Escala de comparação: forma dos grãos x coeficiente de esfericidade



Fonte: Di Bernardo (2003)

Já o diâmetro volumétrico, de acordo com Di Bernardo (2003) pode ser calculado pela seguinte fórmula:

$$dv = \sqrt[3]{\frac{6M_g}{\pi\rho_g N_g}} \quad (1)$$

Onde:

dv = diâmetro volumétrico médio (m);

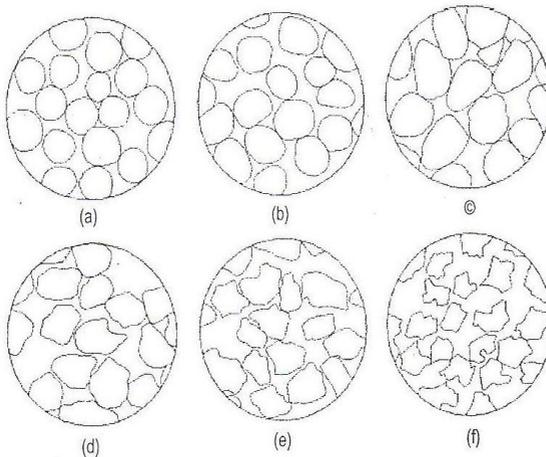
M_g = massa de grãos de cada faixa granulométrica (kg);

ρ_g = massa específica do material (kg/m³);

N_g = número de grãos.

A título de comparação, Libânio (2008) ilustra na imagem a seguir as distintas formas de grão, bem como as suas porosidades e esfericidades:

Figura 30 – Diferentes formas de grãos e suas respectivas características



Forma do grão	Esférico (a)	Arredondado (b)	Desgastado (c)	Agudo (d)	Angular (e)	Triturado (f)
Esfericidade	1,00	0,98	0,94	0,81	0,78	≤ 0,70
Porosidade	0,38	0,38	0,39	0,40	0,43	0,48

Fonte: Libânio (2008)

e) porosidade (ϵ):

Libânio (2008) define a porosidade como a relação entre o volume de vazios e o volume total ocupado pelo meio filtrante. “É um parâmetro muito importante na determinação da velocidade de água requerida para lavagem do meio filtrante, na perda de carga no meio filtrante fixo e na capacidade de retenção de impurezas” (DI BERNARDO, 2003, p.38). Libânio (2008) complementa expondo que quanto maior o coeficiente de esfericidade, menores são os espaços vazios e menor será a porosidade.

f) massa específica:

Di Bernardo (2003) explana que massa específica é o resultado da divisão da massa de um material pelo seu volume. É, portanto, uma característica específica do material que compõe o leito filtrante (DI BERNARDO, 1993). Libânio (2008) comenta que a densidade (resultado da massa específica dividida por massa específica da água) não influi na retenção de partículas. Mas Di Bernardo (2003) lembra que a massa específica influencia a perda de carga, bem como a expansão e fluidificação do meio filtrante durante a lavagem. Di Bernardo (1993) afirma que muitas vezes, a massa específica é abordada como massa específica aparente, que é o resultado da multiplicação da massa específica pelo volume ocupado pelo sólido ($1-\epsilon$).

Libânio (2008) comparou as principais características de alguns meios filtrantes em uma tabela, conforme segue:

Tabela 5 – Principais meios filtrantes e suas características

Característica	Areia	Antracito	Carvão ativado	Granada
Densidade	2,65	1,45 a 1,73	1,3 a 1,5	3,6 a 4,2
Porosidade (%)	42 a 47	56 a 60	50	45 a 55
Esfericidade (Ψ)	0,7 a 0,8	0,46 a 0,60	0,75	0,6

Fonte: Libânio (2008)

g) dureza:

É a resistência oferecida pelo grão à fragmentação (LIBÂNIO, 2008). Di Bernardo (2003) explica que a dureza está relacionada com a resistência à abrasão. Já Libânio (2008) ressalta que esta característica está relacionada à vida útil do leito. A fluidificação e expansão do leito durante as lavagens podem desgastar os grãos, alterando a curva

granulométrica – daí a importância da dureza (DI BERNARDO, 2003). Di Bernardo (2003) expõe que a dureza é definida de acordo com a escala de Mohs, conforme segue:

Tabela 6 – Dureza dos materiais na escala de Mohs

Material	Dureza	Material	Dureza
Talco	1	Ortoclásio	6
Gipsita	2	Quartzo	7
Calcita	3	Topázio	8
Fluorita	4	Coríndon	9
Apatita	5	Diamante	10

Fonte: Di Bernardo (2003)

A determinação da dureza é bastante simples. Deve-se, de acordo com Di Bernardo (2003), riscar os grãos do elemento filtrante com os minerais da escala de Mohs – a dureza será igual ao número do mineral imediatamente inferior àquele que conseguir riscar o grão.

h) solubilidade em ácido clorídrico:

Este teste, de acordo com Di Bernardo (2003), visa encontrar impurezas solúveis em ácido que podem ser liberadas na água pelo meio filtrante. Di Bernardo (1993) cita que o ensaio deve ser realizado com ácido clorídrico concentrado (1,18 g/cm³).

i) solubilidade em hidróxido de sódio:

Di Bernardo (2003) comenta que este teste mostra qual é a porcentagem (em massa) de compostos do material filtrante que são solúveis em hidróxido de sódio 1% (massa/volume). O ensaio é realizado imergindo uma amostra de material filtrante em um volume conhecido de solução de hidróxido de sódio 1% (DI BERNARDO, 2003).

5 O PROBLEMA

Na busca por mais competitividade mercadológica, as empresas vem investindo fortemente em melhorias que reflitam em incremento de performance produtiva. Necessariamente, a melhoria de desempenho passa pela redução de subprodutos, indesejáveis em todos os ramos da indústria.

Neste contexto, as empresas fabricantes de pavimentos e revestimentos cerâmicos não são exceção. Embora a produção venha sendo aprimorada ano após ano, seja pela adoção de melhores práticas de fabricação, seja pelo advento de novas tecnologias, vários subprodutos ainda são gerados no processo cerâmico. Dentre eles, o mais preocupante é o chamote – nome usualmente atribuído às peças quebradas após etapa de queima.

Figura 31 – Chamote de porcelanato



Fonte: Dados primários (2012)

As características do processo cerâmico permitem que todos os seus subprodutos sejam reaproveitados na própria fabricação, sendo retroalimentados no início do processo produtivo como se fossem matérias-primas. Mas para o chamote, isto é parcialmente válido. Ao contrário dos demais subprodutos, o chamote apresenta elevada dureza e boa resistência a choques e impactos. Se for retroalimentado no início do processo, ou seja, na fase de moagem, o referido subproduto provoca a perda de eficiência na fragmentação. Por ser mais duro e resistente que as demais matérias-primas habitualmente empregadas, o chamote prolonga a moagem, de modo que o moinho precisará operar por mais tempo unicamente para conseguir fragmentá-lo. O prolongamento da moagem, além de propiciar perdas de produtividade, também onera

financeiramente o processo, haja vista que o consumo de energia elétrica será maior. Não bastassem as dificuldades mencionadas, o chamote é totalmente inerte do ponto de vista técnico, de forma que a sua retroalimentação não acrescenta ganho algum em termos de qualidade de produto.

Se o chamote for proveniente do processo de fabricação de porcelanato, o problema é ainda maior. Por apresentar características técnicas superiores a outras cerâmicas, o chamote de porcelanato é ainda mais duro e resistente. E, por consequência, sua moagem é ainda mais dificultosa. A ineficiência que o chamote de porcelanato provoca à operação de moagem pode ser comprovada na etapa de peneiramento. A fim de evitar o aparecimento de defeitos no produto final, todo o material que sai do moinho é peneirado, processo este que é responsável pela eliminação de boa parte dos contaminantes da massa cerâmica. O chamote de porcelanato, que sai do moinho praticamente intacto, é removido quase que totalmente do seio da massa cerâmica pelo peneiramento. Para ilustrar esta situação, a imagem a seguir mostra o material retido por uma peneira industrial. As partículas grandes de diversas cores são pedaços de chamote de porcelanato que não conseguiram ser moídos.

Figura 32 – Material retido em peneiramento industrial



Fonte: Dados primários (2012)

Uma vez em contato com o restante do material retido pelas peneiras, torna-se inviável reaproveitar o chamote no próprio processo, já que este acaba por ficar impregnado de contaminantes causadores de defeitos de fabricação. Por isso, o destino do chamote que não consegue passar pela malha das peneiras acaba sendo o aterro industrial. Neste

caso, além do gasto energético com moagem e peneiramento, é preciso despende recursos para a disposição final do chamote.

Mesmo frente a tantas desvantagens, a retroalimentação do chamote é a prática mais comumente empregada nas empresas cerâmicas para destinação do referido subproduto. Além da crescente força que a legislação ambiental vem adquirindo e dos elevados custos de destinação em aterro industrial, faltam opções economicamente interessantes para reaproveitá-lo. Muitas vezes, é mais vantajoso ao fabricante retroalimentar o chamote ao início do processo do que adequá-lo para uma destinação final ecologicamente correta. Deriva daqui a necessidade de que sejam encontradas alternativas mais viáveis para a destinação do chamote de porcelanato.

6 MÉTODO EXPERIMENTAL

O objetivo principal deste trabalho de pesquisa é viabilizar a substituição dos meios filtrantes de areia, empregados nos filtros de tratamento de água, por meios filtrantes obtidos pela britagem de chamote de porcelanato. Para uma melhor abordagem, a pesquisa foi dividida em etapas, a serem executadas na seguinte ordem:

- a) caracterização do chamote, onde se busca conhecer melhor as suas propriedades físico-químicas de diversos prismas, enquanto material cerâmico, resíduo sólido industrial e elemento filtrante para tratamento de água, comparando-o com a areia, sempre que possível;
- b) preparo dos meios filtrantes de chamote e areia. Esta etapa também envolve a definição e formulação de distribuições granulométricas a serem empregadas como meios filtrantes em filtros de laboratório tanto para o chamote de porcelanato britado, quanto para areia;
- c) realização de filtrações em laboratório, de modo a comparar a eficiência de filtração do chamote frente à areia, que é o elemento filtrante mais empregado no mundo;
- d) coleta e análise de dados obtidos nas filtrações, dentre os quais: turbidez, pH, vazões de entrada / saída da água submetida à filtração, tempo de operação dos filtros e qualidade da água filtrada, de maneira a possibilitar a realização de um comparativo entre os resultados obtidos com os meios filtrantes de areia e chamote britado.

As seções a seguir abordam de modo aprofundado a metodologia de trabalho empregada para cada uma das etapas.

6.1 CARACTERIZAÇÃO DO CHAMOTE

A caracterização do chamote é a primeira medida a ser tomada. Di Bernardo (2003) comenta que esta etapa – imprescindível para o projeto de sistemas de filtração – busca levantar dados que possibilitem conhecer as características dos materiais granulares que compõem o meio filtrante. Assim, esta se dará à luz de três pontos de vista distintos:

- a) o chamote como material cerâmico;
- b) o chamote como subproduto de um processo industrial; e
- c) o chamote como elemento filtrante para tratamento de água.

Cada modo de caracterização apresenta particularidades que serão mais bem abordadas na sequência.

6.1.1 Caracterização cerâmica

A caracterização cerâmica visa levantar as propriedades produtivas e técnicas relevantes do chamote de porcelanato como produto de revestimento. Tem por objetivos elucidar se há chamote em quantidades suficientes para justificar o emprego a que se propõe; e dimensionar a dificuldade da operação de britagem, operação esta responsável em transformar o chamote em elemento filtrante.

No que tange às propriedades produtivas, optou-se por examinar as seguintes: volume de produção na unidade fabril onde o trabalho foi desenvolvido; o mapeamento da geração de chamote; e os principais defeitos que levam ao descarte da peça cerâmica. Esta etapa ajuda a dimensionar o problema e a ponderar se há geração do resíduo em quantidades interessantes do ponto de vista econômico.

Em um segundo momento, focam-se as características técnicas do revestimento cerâmico gerador do chamote, como absorção de água e resistência mecânica (também comumente conhecida como resistência à flexão). A absorção de água é um indicativo da porosidade do material cerâmico, enquanto a resistência à flexão expressa quão difícil será a sua fragmentação por meio de esforços mecânicos. Tais características avaliadas em conjunto dão ideia da resistência do revestimento a choques e impactos – um predicado importante para a correta escolha dos métodos de transformação do chamote em grãos. Os métodos de ensaio são sugeridos pela norma NBR 13818:1997.

6.1.2 Caracterização como resíduo sólido

A intenção nesta etapa é conhecer a fundo o chamote, bem como os seus componentes, e assim detectar possíveis riscos quanto à contaminação da água e do solo. Além disso, visa-se assegurar que a sua aplicação como meio filtrante não propiciará o aparecimento de substâncias indesejáveis na água filtrada. Neste contexto, realizaram-se dois ensaios: um com vistas a levantar a composição química do chamote; e outro para classificação do chamote como resíduo sólido.

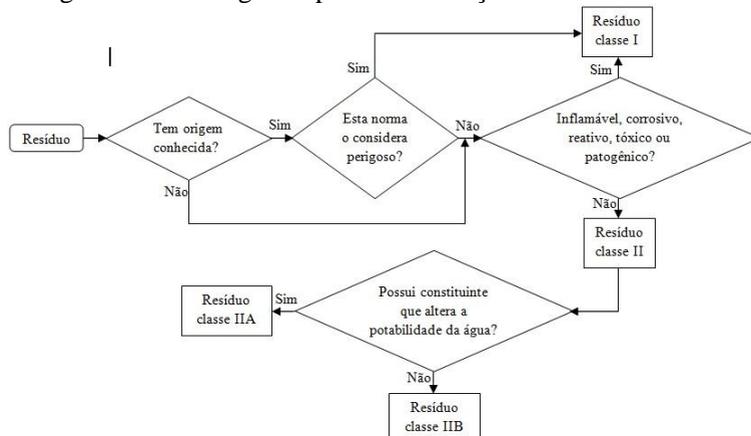
A composição química foi obtida por análise química completa do chamote pelos métodos de espectrometria de fluorescência de raios X

e espectrometria de absorção atômica. Assim como as cerâmicas tradicionais, o chamote é composto basicamente por óxidos. A análise química tem por intuito identificar todos os óxidos que o compõe e indicar se entre eles há a presença de materiais perigosos – o que inviabilizaria o seu uso para o fim desejado.

Quanto à classificação como resíduo sólido industrial, a mesma foi realizada conforme a norma NBR 10004:2004. Este ensaio visa classificar o resíduo em questão como perigoso (classe I), não-perigoso não-inerte (classe IIA) e não-perigoso inerte (classe IIB).

De acordo com a norma, são perigosos (classes I) os resíduos que ofereçam periculosidade ou apresentem ao menos uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade. Classifica-se como não-perigosos inertes (classe IIB) todos os resíduos que, quando em contato com água destilada ou deionizada à temperatura ambiente, não solubilizem nenhum de seus constituintes a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, com exceção do aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor. Já a classe dos resíduos não-perigosos não-inertes (classe IIA), por sua vez, engloba todos os resíduos que não se encaixam em nenhuma das classes anteriores. Podem, contudo, apresentar características como solubilidade em água, biodegradabilidade ou combustibilidade. A figura seguir resume os critérios empregados pela norma NBR 10004:2004 na classificação dos resíduos sólidos:

Figura 33 – Fluxograma para classificação de resíduos sólidos



Fonte: Adaptado de NBR 10004:2004 (2004)

Para ser empregado como material filtrante no tratamento de água faz-se necessário que o resíduo cerâmico queimado figure obrigatoriamente na classe IIB – resíduo não-perigoso inerte.

6.1.3 Caracterização como elemento filtrante

Esta caracterização objetiva demonstrar se o chamote, uma vez britado, possui potencial para uso como elemento filtrante. É uma importante etapa, pois expõe as propriedades do chamote fragmentado que são indesejáveis aos leitos filtrantes, permitindo assim que medidas para corrigir estes eventuais problemas sejam delineadas.

As medições propostas nesta etapa somente serão passíveis de serem realizadas se o chamote se encontrar em forma de grãos. Para tal, foi necessário fragmentá-lo em um britador de martelos, peneirá-lo industrialmente em uma malha de 10 mesh e só então submetê-lo à caracterização.

A caracterização, por sua vez, consiste na realização de uma curva granulométrica do chamote britado, e na realização de alguns ensaios propostos por Di Bernardo (2003). Em sua obra, Di Bernardo (2003) sugere caracterizar os elementos filtrantes através da realização dos seguintes ensaios: tamanho dos grãos; tamanho efetivo; coeficiente de desuniformidade; forma e geometria dos grãos; porosidade; massa específica; solubilidade em ácido clorídrico; e solubilidade em hidróxido de sódio. Destes ensaios, os dois últimos não foram realizados, uma vez que são integrantes da caracterização de resíduo sólido exigida pela norma NBR 10004:2004. Sempre que possível, os resultados obtidos nesta etapa foram comparados aos dados da areia, meio filtrante mais empregado no mundo. Os métodos de ensaio aqui envolvidos estão devidamente descritos na seção 4.3.3 deste trabalho.

Com isto, encerra-se a caracterização completa do chamote de porcelanato. Se nenhum grave impedimento for encontrado nesta etapa, pode-se passar à próxima fase: britar o chamote bruto e avaliar se o granulado obtido apresentará potencial para uso como leito filtrante.

6.2 PREPARO DOS MEIOS FILTRANTES

Sendo o chamote de porcelanato aprovado nas caracterizações, o mesmo deve ser manuseado de tal modo a transformá-lo em um

elemento filtrante que, por sua vez, deve ser submetido a ensaios de filtração laboratorial frente à areia – elemento filtrante mais empregado no mundo. Para tanto, areia e chamote devem passar por tratamento adequado que tem por função gerar meios filtrantes obtidos com materiais distintos, mas com características granulométricas semelhantes, de ordem a permitir uma comparação apropriada de ambos quando do ensaio de filtração. É justamente deste tratamento que esta seção abordará.

6.2.1 Preparação do chamote de porcelanato

A preparação do meio filtrante tem a responsabilidade de transformar o subproduto cerâmico queimado em um material granulado com características semelhantes à maioria dos materiais filtrantes existentes no mercado. Consiste, basicamente, na britagem e classificação granulométrica do material em questão, com o objetivo de transformar a quebra do porcelanato em um elemento filtrante.

Para tanto, amostras de chamote de porcelanato pré-fragmentado por trator de esteira foram recolhidas. O mesmo foi triturado em um britador de martelos, peneirado industrialmente em uma malha de 10 mesh e só então submetido ao ensaio de caracterização granulométrica.

Figura 34 – Britador, martelos e peneira



Fonte: Dados primários (2012)

Para ensaios em laboratório, Di Bernardo (2003) sugere que o elemento filtrante a ser testado seja separado em três diferentes granulometrias:

- a) finos: grãos de tamanho entre 0,297 e 0,420mm;
- b) médios, os grãos de tamanho entre 0,420 e 0,840mm; e
- c) grossos, os grãos de tamanho entre 0,590 e 1,410mm.

Sob esta ótica, grãos maiores que 1,410mm e menores que 0,297mm devem ser descartados.

Todo o material britado industrialmente foi desumidificado em estufa a 125°C até peso constante. Uma vez seco, o mesmo foi peneirado em um conjunto de malhas com aberturas de 1400µm, 710µm, 425µm e 300µm com o auxílio de vibrador de peneiras por 15 minutos. Tal processo permitiu a obtenção de chamote de porcelanato britado e classificado.

6.2.2 Preparação da areia

O chamote fragmentando e classificado deve ter sua eficiência de filtração comparada à eficiência da areia em filtros de laboratório. Por isso, semelhante procedimento realizado ao primeiro teve de ser tomado à segunda, com exceção da etapa de britagem e classificação granulométrica. A dispensa de tais operações foi possível porque a areia empregada foi gentilmente cedida por uma grande empresa de saneamento do Estado de Santa Catarina, já lavada, seca e classificada.

Embora se tenha solicitado areia com granulometria de acordo com a recomendação de Di Bernardo (2003), conforme fora explanado na seção anterior deste trabalho, apurou-se que as peneiras utilizadas na classificação granulométrica pela empresa responsável por ceder a areia são levemente distintas daquelas utilizadas na classificação do chamote britado. Esta empregou peneiras com abertura de 250µm (ao invés de 300µm), 420µm (ao invés de 425µm) e 840µm (ao invés de 710µm). Embora as malhas utilizadas na classificação da areia e do chamote britado não tenham sido exatamente as mesmas, tal desvio não foi considerado significativo.

6.2.3 Definição das granulometrias de trabalho

Estando a areia e o chamote britado já devidamente classificados, a próxima etapa consiste em definir as quantidades de cada tamanho de grãos responsáveis por formar os meios filtrantes. Para ensaios de tratabilidade em laboratório, Di Bernardo (2003) mostra que a seleção dos tamanhos de grãos para compor o leito de filtragem depende fundamentalmente da qualidade da água a tratar. “Para águas brutas com valores de turbidez superiores a 50uT, ou que contenham quantidades significativas de algas, a tendência será utilizar as granulometrias mais

grossas” (DI BERNARDO, 2003, p.169). Já quando os ensaios de laboratórios são utilizados como ferramenta de monitoramento operacional de uma estação de tratamento de água, Di Bernardo (2003) recomenda escolher as granulometrias de material filtrante para o trabalho em laboratório em função da qualidade da água tratada no filtro em escala real. Neste caso, pois, deve-se trabalhar em laboratório com granulometrias que apresentem o mesmo resultado dos filtros reais. Como o trabalho aqui desenvolvido consiste de um estudo de tratabilidade e não de um monitoramento operacional, optou-se por fazer a seleção granulométrica do meio filtrante por meio em função da qualidade da água a tratar.

No específico caso deste trabalho, a turbidez da água bruta a ser tratada está em torno de 5 NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez) – bem abaixo das 50uT (unidades de turbidez) recomendadas por Di Bernardo (2003). Portanto, é aconselhável empregar granulometrias mais finas na filtração. Como o propósito é avaliar o desempenho do chamote como elemento filtrante, foi-se além do que é recomendado por Di Bernardo (2003): ao invés de se proceder a filtração apenas com distribuição de grãos mais finos, optou-se também por realizar filtrações com distribuições mais ricas em médios e em grossos.

Foram, portanto, definidas três configurações granulométricas, denominadas de acordo com a granulometria de grão predominante. Seguindo esta lógica, a formulação “média” é aquela com maior quantidade de grãos médios; a formulação “grossa”, a com maior quantidade de grãos grossos; e a formulação “fina”, a com maior predominância de grãos finos. Assim, foram obtidos três meios filtrantes para cada um dos materiais (areia e chamote britado). A tabela exposta na sequência exprime a distribuição mássica de grãos de cada uma das formulações granulométricas:

Tabela 7 – Composição granulométrica mássica dos leitos testados

Nome da formulação	Composição Mássica por Tamanho de Grão (%)		
	Grãos Pequenos	Grãos Médios	Grãos Grandes
Fina	60	30	10
Média	25	50	25
Grossa	10	30	60

Fonte: Dados primários (2012)

As amostras foram dosadas com a ajuda de uma balança laboratorial com incremento digital de 0,01g. Para cada formulação granulométrica, após a pesagem de cada um dos tamanhos de grãos que a compõe, os grãos grossos, médios e finos foram colocados em embalagens plásticas e agitados manualmente por aproximadamente dois minutos de modo a garantir sua completa homogeneização. Feito isso, as mesmas eram encaminhadas para serem devidamente acondicionadas.

Por fim, é válido lembrar que a granulometria a ser empregada em laboratório “não necessariamente tem de ser similar a adotada no filtro em escala real, isso porque os mecanismos que atuam em cada situação são diferenciados em função da escala de tempo de operação dos filtros” (DI BERNARDO, 2003,p.169).

6.2.4 Acondicionamento e manipulação do meio filtrante

As formulações pesadas foram alocadas em embalagens plásticas e vedadas contra a entrada de umidade do ar. As embalagens apenas foram abertas no momento do uso do meio filtrante.

Figura 35 – Acondicionamento dos meios filtrantes utilizados



Fonte: Dados primários (2012)

Momentos antes da acomodação dos leitos no interior dos filtros de laboratório, as formulações a serem testadas foram postas em béqueres e mergulhadas em água destilada, conforme orientação de Di Bernardo (2003). Somente então, estas foram depositadas no interior dos filtros.

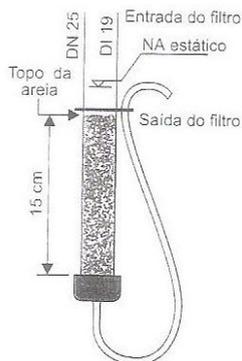
6.3 FILTRAÇÃO EM LABORATÓRIO

6.3.1 Montagem do filtro de laboratório

A montagem do filtro de laboratório está diretamente ligada ao sucesso nos ensaios de tratabilidade. Di Bernardo (2003) recomenda que os ensaios de filtração em laboratório sejam realizados em filtros de papel – tradicionais nos laboratórios de química – ou em filtros de laboratório de areia – também conhecidos pela sigla FLA. Embora o filtro de papel seja mais prático, barato e fácil de manusear, Di Bernardo (2003) sugere que ensaios de tratabilidade sejam realizados em filtros de laboratório de areia, pois proporcionam resultados mais representativos. Este fato justifica a escolha do FLA no desenvolvimento deste estudo.

O FLA é bastante simples. “O filtro consiste de uma seção de tubo de 30 a 40 cm de comprimento, com diâmetro interno de 19 mm. Na parte inferior do tubo é acoplado um cap de PVC dotado de uma tela e de dispositivo de saída” (DI BERNARDO, 2003,p.168). A tela serve como suporte do leito filtrante. Por sua vez, o dispositivo de saída resume-se a um orifício no centro do cap, no qual se acopla uma mangueira para escoamento da água filtrada. Di Bernardo (2003) ainda indica o uso de um tubo de PVC ou de acrílico para a fabricação do corpo do filtro e, caso opte-se pelo PVC, será necessário confeccionar um bastão graduado – denominado “tubo calibrador” – a ser empregado para mensurar a altura de material filtrante durante a acomodação do leito fixo (areia / chamote) no interior do filtro.

Figura 36 – Esquema de montagem do filtro de laboratório



Fonte: Di Bernardo (2003)

Dois filtros de laboratório foram confeccionados, sendo um para operar com areia e outro com chamote britado, de modo que ambos trabalhem em paralelo, permitindo que uma comparação entre eles possa ser executada. Contrariando as recomendações de Di Bernardo (2003), o filtro foi confeccionado com um tubo de PVC de 22 mm de diâmetro interno e com comprimento total de 50 cm devido a dificuldades técnico-financeiras. As demais recomendações do autor foram adotadas.

Quanto ao recheio do filtro de laboratório, Di Bernardo (2003) sugere que o material filtrante preencha 15 cm da altura do corpo do FLA, conforme expressa a figura anterior. Ainda segundo o mesmo autor, a deposição do leito filtrante no interior do filtro deve seguir os seguintes passos:

- 1) Colocar o meio filtrante em um béquer e adicionar água destilada suficiente para submergir todo material. Agitar a mistura com um bastão de vidro, de modo a manter o meio filtrante em suspensão e, então, inclinar o béquer de modo a permitir o escoamento da mistura para o interior do filtro de laboratório. Durante a deposição do meio filtrante, que pode ser feita com a ajuda de um funil, adicionar simultaneamente água destilada para auxiliar no assentamento do material no fundo do filtro;

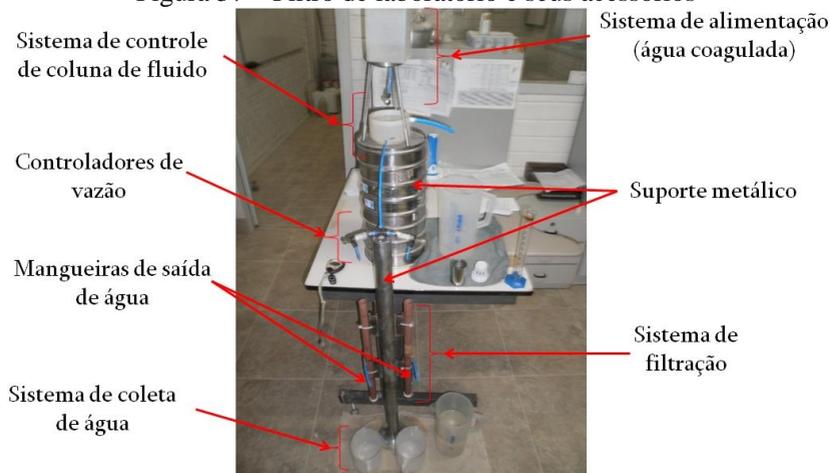
- 2) Tendo terminado a alocação do meio filtrante, compactar o recheio para evitar a formação de vazios ou bolsas de ar. Para realizar a compactação, deve-se segurar o filtro de laboratório por sua parte superior e, com ajuda de um bastão, bater-se levemente na sua parte inferior (cap), tomando cuidado com a altura do leito filtrante (15 cm);

- 3) Ao final deste procedimento, fixa-se o filtro de laboratório em um suporte, e, por fim, acoplam-se e posicionam-se as mangueiras de entrada e de saída de água.

Como o filtro opera a taxa declinante em fluxo descendente, é preciso executar a alimentação de água de modo constante em sua extremidade superior. Para que isso seja possível, o sistema de alimentação do filtro foi dotado de um controlador de coluna de fluido, de modo a manter o nível da água sempre constante e, assim, evitar variações na vazão de entrada dos filtros. Ao passar pelo controlador de coluna de fluido, a água é encaminhada por mangueiras à entrada do FLA, onde uma válvula controladora controla a vazão de entrada de

água no sistema de filtração. A ilustração a seguir mostra o conjunto completo já montado. O filtro a esquerda foi recheado com areia, enquanto o da direita foi recheado com chamote britado:

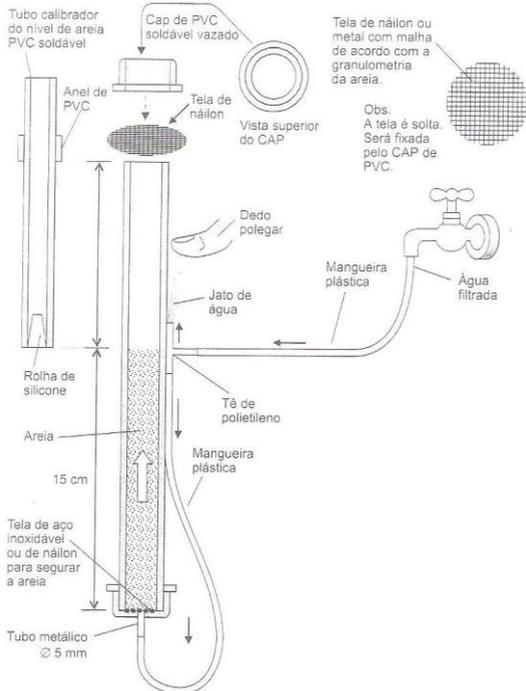
Figura 37 – Filtro de laboratório e seus acessórios



Fonte: Dados primários (2012)

Di Bernardo (2003) faz ainda uma última consideração com respeito à limpeza do filtro de laboratório. À medida que o filtro opera, seu leito vai ficando impregnado de sujidades. Por isso, faz-se necessária a realização de limpezas periódicas no FLA. A limpeza é realizada injetando-se água potável em contracorrente (na parte inferior do equipamento), de modo a fluidificar o elemento filtrante. Para evitar a fuga do leito filtrante pela parte superior do equipamento durante a operação de limpeza, deve-se posicionar um cap perfurado dotado de uma tela metálica na parte superior do filtro antes de se iniciar a retrolavagem. A água de limpeza, proveniente de uma torneira de água potável, é fornecida ao filtro por uma mangueira acoplada ao seu orifício inferior. O conjunto deverá apresentar aspecto semelhante ao do croqui:

Figura 38 – Esquema de montagem do filtro de laboratório



Fonte: Di Bernardo (2003)

6.3.2 Princípio de funcionamento do filtro

O FLA opera em sentido descendente; portanto, a força da gravidade tem papel importante na sua operação. A água a filtrar, após passar por um pré-tratamento em laboratório (conforme seção 6.3.5 deste trabalho), é fornecida manualmente ao sistema de alimentação em intervalos de aproximadamente 30 minutos. Sua função é suprir os filtros com água de maneira perene. Por ação da gravidade, a água contida no sistema de alimentação passa por uma válvula controladora de vazão e segue ao sistema de controle de coluna de fluido.

A função do sistema de controle de coluna de fluido consiste em manter constante a altura da coluna de água que entrará nos sistemas de filtração, de forma a evitar que ocorram variações de vazão na entrada dos filtros. Todo o excesso de água proveniente do sistema de alimentação é extravasado a um recipiente coletor. Deste sistema, a água

a filtrar é encaminhada por ação da gravidade a válvulas controladoras de vazão, sendo uma para cada filtro (areia e chamote), de onde a água finalmente é gotejada na entrada dos filtros. É interessante observar que a água proveniente do sistema de alimentação é a mesma tanto para o filtro de areia quanto para o filtro de chamote britado.

Ambos os filtros são operados “afogados”, isto é, o leito filtrante em seu interior sempre deve ficar submerso na água. Para tal, as mangueiras de saída dos filtros foram posicionadas levemente acima do nível do leito filtrante. A medida em questão visa impedir a formação de caminhos preferenciais nos leitos de filtração, bem como evitar que a sujeira aderida aos grãos do leito seja carregada pela passagem de água pelo meio filtrante.

A água que adentra aos filtros é impelida a passar entre os grãos do leito de filtração por ação da força da gravidade. Deste processo, os materiais indesejáveis suspensos na água são retirados do seio aquoso e a água, agora filtrada, sai do sistema de filtração por meio de mangueiras. As mangueiras encaminham a água a recipientes, de onde serão tomadas amostras periodicamente para caracterização.

6.3.3 Definição dos parâmetros de filtração

A operação dos filtros exige a definição de parâmetros para o bom andamento do processo. Neste sentido, o trabalho de Di Bernardo (2003) foi de extrema valia.

O primeiro parâmetro a ser definido diz respeito à taxa de filtração, parâmetro indicativo da velocidade de filtração, que deve ser monitorada e controlada continuamente durante a operação. A taxa de filtração está diretamente ligada à vazão; portanto, para se controlar a taxa de filtração é preciso controlar a vazão de entrada dos FLAs. “A taxa de filtração recomendada para a realização dos ensaios é de 60 a 100 m/d, o que, para as dimensões de filtro mencionadas equivale a uma vazão da ordem de 12 a 20 mL/min” (DI BERNARDO, 2003, p.168). Para chegar a esta conclusão, Di Bernardo (2003) considerou que o filtro teria diâmetro interno de 19 mm. Mas o tubo empregado neste trabalho de pesquisa tem, na verdade, diâmetro interno de 22 mm, o que implica na aplicação de vazões entre 15,8 e 26,4 mL/min. Além da entrada, o controle de vazão também foi realizado na saída do filtro, o que permite monitorar a colmatação do FLA.

Durante a operação do filtro de laboratório, amostras da água efluente devem ser coletadas, para avaliação das filtrações, tanto para o filtro recheado com areia, quanto para o filtro recheado com chamote britado. De acordo com a recomendação de Di Bernardo (2003), deve-se aguardar de 10 a 30 minutos após o início da filtração antes de se tomar a primeira amostragem, de modo a garantir que o startup do sistema não influencie na tomada de dados. Para o caso prático, optou-se por aguardar 20 minutos.

Quanto ao volume tomado pela amostragem, Di Bernardo (2003) explica que o volume a ser amostrado depende dos parâmetros a serem avaliados. A eficiência de filtração será avaliada através de parâmetros operacionais e de ensaios de laboratório. Entre os parâmetros operacionais avaliados citam-se: vazão de entrada, vazão de saída e tempo de operação. Já os ensaios de laboratório englobam: turbidez, percentual de remoção de turbidez e pH. Os parâmetros operacionais são mensurados durante a operação do filtro, enquanto os ensaios de laboratório dependem de amostras para serem mensurados. Logo, o tamanho da amostragem deve ser definido tendo por base apenas os ensaios laboratoriais. Apurou-se que estes poderiam ser avaliados a partir de 50 mL de amostra. Por isso, definiu-se que o volume de amostragem seria de 50 mL. O excedente da amostragem que não fosse empregada na realização dos ensaios seria armazenado em vasilhames e, ao término da filtração, uma amostragem de 500 mL deste seria tomada para avaliação da qualidade da água em ensaios mais detalhados.

Assim como ocorrido na definição do volume de amostragem, Di Bernardo (2003) também não faz recomendações quanto à frequência de amostragem. Convencionou-se realizar amostragens a cada 20 minutos, frequência que permite a avaliação da filtração ao longo do tempo com um bom número de dados.

Embora os parâmetros tempo de operação e limpeza do filtro estejam intimamente ligados, Di Bernardo (2003) não faz menção a respeito do primeiro, apenas elucida que a limpeza deve ser realizada assim que o filtro apresentar sinal de colmatção. Sob a luz deste raciocínio, o tempo de operação é função do tempo de colmatção. Por isso, convencionou-se que os filtros de laboratório seriam operados até o seu completo entupimento, fenômeno caracterizado pelo transbordamento de água pela parte superior do tubo. Se transcorridas nove horas completas de operação ininterruptas sem o entupimento, o filtro seria parado compulsoriamente. Independentemente do motivo,

uma vez parado, o filtro tem de ser obrigatoriamente lavado. Por sugestão de Di Bernardo (2003), as limpezas foram realizadas empregando o método de retrolavagem, através da injeção de água sob pressão em sentido ascendente no interior do FLA por três minutos. Após a limpeza, o autor ainda aconselha manter o leito filtrante submerso em água destilada no interior do próprio filtro até a sua próxima utilização.

Figura 39 – Limpeza do FLA por retrolavagem



Fonte: Dados primários (2012)

Por fim, a última definição diz respeito ao número de ensaios a serem realizados. Embora não haja menção na obra de Di Bernardo (2003), estabeleceu-se que seriam realizados cinco ensaios de filtração em cada granulometria, o que resulta em 15 ensaios de filtração para cada material filtrante.

6.3.4 Coleta, acondicionamento e caracterização da água bruta

Sem água é impossível avaliar a eficiência de filtração dos leitos de filtragem em estudo, fato que remete obrigatoriamente à correta seleção e caracterização da água bruta a ser empregada. É de suma importância que a água a ser filtrada em areia e em chamote britado seja a mesma e que receba o mesmo tratamento, contribuindo assim para minimizar erros.

Neste contexto, o Rio Cocal foi o curso d'água escolhido para fornecer a água a ser utilizada nas filtrações laboratoriais. A captação da água bruta foi realizada em janeiro de 2012 no município catarinense de

Cocal do Sul, onde o rio em questão é a principal fonte de água para abastecimento público do município – fato este que justifica a sua escolha. A água coletada foi acondicionada em três tambores de 50L que, por sua vez, foram alocados em um local coberto e arejado, ao abrigo das intempéries.

Figura 40 – Tambor de armazenamento de água bruta



Fonte: Dados primários (2012)

As características do corpo d'água impedem que a filtração de suas águas se dê de modo direto. Antes de filtrá-la, é necessário realizar um pré-tratamento composto por coagulação química, floculação e decantação. Devido a este fato, ao término da coleta da água bruta, uma amostra foi recolhida para ser caracterizada. A caracterização – que consiste da medição de turbidez, pH, alcalinidade e cor – teve por intuito levantar os dados necessários ao dimensionamento das etapas de coagulação e floculação. Os resultados da caracterização constam da seção 7.2.2 deste trabalho. Feito isto, o próximo passo consistiu em preparar a água bruta para a filtração.

6.3.5 Preparo e caracterização da água a filtrar

Di Bernardo (2003) separa as tecnologias para tratamento de água em dois grupos: as que se baseiam na filtração rápida e as que se baseiam na filtração lenta. “O primeiro grupo tem a coagulação química e a filtração rápida como etapas fundamentais para clarificação da água, ao passo que no segundo grupo a etapa básica é a filtração lenta e o uso de coagulantes é dispensável” (DI BERNARDO, 2003, p.160). Trazendo esta informação à luz do caso estudado neste trabalho de pesquisa, percebe-se que embora a água bruta apresente boas

características “in-natura”, é prudente executar o pré-tratamento antes de filtrá-la, haja vista que o filtro de laboratório foi desenvolvido para operar como um filtro rápido.

Assim sendo, toda a água utilizada nos ensaios de filtração foi pré-tratada em laboratório e, para que o resultado almejado fosse atingido, foi necessário definir a sua metodologia de realização. Neste sentido, o teste de jarro – também conhecido como jarteste – foi bastante útil.

O equipamento utilizado no teste de jarro é dotado de seis recipientes em acrílico, denominados “jarros”, contando cada um com sistema de agitação de velocidade variável e ajustável. O referido equipamento foi útil em dois momentos: primeiramente, na determinação da quantidade ótima de agente coagulante a ser adicionado à água bruta e, em um segundo momento, realizando o pré-tratamento da água a ser filtrada no FLA com base nos resultados obtidos no ensaio para determinação da quantidade ótima de agente coagulante. Conforme se pode observar, a determinação da quantidade ótima de agente coagulante é determinante: se a quantia aplicada à água for inferior à ótima, a coagulação química será incompleta; se for superior, ocorrerá uma diminuição do pH do meio aquoso em virtude do efeito do íon comum e – como consequência disto – a inibição da coagulação química. A ilustração a seguir exhibe o equipamento:

Figura 41 – Tambor de armazenamento de água bruta



Fonte: Dados primários (2012)

O ensaio para determinação da quantidade ótima de agente coagulante é explicada por Di Bernardo (2003) de modo resumido nos seguintes passos:

1) colocar a água bruta em cada um dos jarros, até atingir o volume marcado – neste caso, dois litros;

2) preparar a solução coagulante e, uma vez pronta, deixá-la em tubos de ensaio até o momento do uso. Optou-se por empregar sulfato de alumínio ($Al_2(SO_4)_3$) como agente coagulante, que foi dissolvido em água destilada e diluído até formar uma solução de 62,5g/L.

3) preparar os recipientes para a coleta das amostras de água de cada jarro;

4) ligar o equipamento e acertar a rotação do sistema de agitação em 100 rpm. Este passo marca o início da etapa de mistura rápida da coagulação;

5) adicionar o agente coagulante já previamente preparado à água. Cada jarro receberá uma dosagem diferente sulfato de alumínio, previamente estabelecida. Para este caso prático, empregaram-se apenas quatro jarros com dosagens de sulfato de alumínio de 6, 8, 10 e 12mg/L;

6) transcorrido o tempo de mistura rápida, reduzir a rotação até atingir o gradiente de velocidade médio de floculação. A diminuição da rotação marca o fim da coagulação e início da floculação. Para o caso este estudo, definiu-se o tempo de mistura rápida em dois minutos; quanto à rotação da etapa de floculação, esta é dividida em duas etapas de igual duração, sendo que a primeira é realizada a 40 rpm e a segunda a 5 rpm, conforme especificação do fabricante do equipamento;

7) transcorrido o tempo de floculação, desligar o sistema de agitação. Conforme expresso no passo anterior, o tempo de floculação determinado pelo fabricante do equipamento é de 20 minutos, sendo os 10 minutos iniciais realizados a 40 rpm e os 10 minutos finais realizados a 5 rpm;

8) proceder imediatamente a coleta de amostras de cada jarro com a ajuda dos recipientes citados no terceiro passo. Por recomendação do fabricante do equipamento de jarreste, diferentemente do que fora recomendado por Di Bernardo (2003), aguardou-se cinco minutos antes de se proceder a coleta das amostras. Estes cinco minutos representam a etapa de decantação de um sistema real de tratamento;

9) Ler os parâmetros de qualidade de cada uma das amostras. Para o caso desta pesquisa, os únicos controles a serem realizados são a medição de turbidez e de pH.

Sabendo que cada jarro possui uma quantidade distinta de agente coagulante, deve ser empregada como dosagem-padrão a quantidade de

agente coagulante utilizada no jarro que apresentar a turbidez menor. Os resultados obtidos neste ensaio podem ser visualizados na seção 7.2.2 deste trabalho.

Uma vez definida a dosagem ótima de agente coagulante, iniciou-se o pré-tratamento propriamente dito. A cada filtração realizada, a água bruta foi retirada do recipiente do qual estava armazenada, sendo posteriormente depositada no equipamento de jarreste. Então, procedeu-se o pré-tratamento da água bruta, de modo exatamente igual ao que fora descrito no ensaio de determinação da quantidade ótima de agente coagulante – a única diferença entre ambos está na dosagem do sulfato de alumínio: enquanto o ensaio de determinação da quantidade ótima de agente coagulante empregou concentrações distintas de agente coagulante em cada jarro, o pré-tratamento empregou sempre a dosagem ótima em todos os recipientes. O seu objetivo era coagular, flocular e decantar a água do melhor modo possível e, para tanto, nada mais recomendável do que empregar a dosagem ótima obtida no ensaio de determinação.

Terminado o pré-tratamento, recolheu-se a água clarificada com a ajuda de um sifão, tomando cuidado para não carrear o material decantado, que deve ser descartado. A água clarificada foi então depositada em galões plásticos de 5L, onde ficou aguardando pela sua filtração. Antes de ser alimentada ao FLA, a água clarificada era caracterizada por meio dos ensaios de turbidez e pH.

Figura 42 – Tambor de armazenamento de água clarificada



Fonte: Dados primários (2012)

É importante ressaltar que apenas a quantidade de água necessária para a cada filtração passava pelo pré-tratamento. Caso sobrasse água

clarificada ao final da filtração, todo excedente era descartado. Desta maneira, o FLA sempre trabalharia com água recém-clarificada.

6.3.6 Filtração em laboratório

A água clarificada após o pré-tratamento era alimentada ao sistema de filtração, conforme descrição da seção 6.3.2 deste trabalho. O resultado do processo de filtração era a própria água filtrada, da qual amostragens periódicas eram retiradas, conforme frequência estabelecida na seção 6.3.3 deste trabalho. A seção seguinte aborda com mais esmero essa questão.

6.3.7 Coleta e caracterização das amostras de água filtrada

À medida que fosse sendo filtrada, a água era recolhida na saída de cada um dos FLAs por um recipiente coletor. A cada 20 minutos de operação, uma amostragem de 50 mL de água filtrada era tomada de cada recipiente coletor na saída dos filtros. Estas amostras eram identificadas e armazenadas ao abrigo da poeira em recipientes de polipropileno. Tomada a amostra de 50 mL, toda a água restante no recipiente coletor era descartada, de modo a permitir que o recipiente coletor fosse recolocado ao sistema filtração vazio. É interessante lembrar que sempre que eram tomadas as amostras, também eram medidas as vazões de entrada e de saída dos FLAs.

Figura 43 – Recipientes de armazenamento de água filtrada



Fonte: Dados primários (2012)

Ao término das filtrações, todas as amostras de água filtrada eram enviadas para caracterização, que consistia na medição de pH e turbidez.

Confrontando-se os resultados aqui obtidos com os mesmos parâmetros da água pré-tratada (pH e turbidez), podem-se mensurar quão efetivas as filtrações foram. Além disso, pode-se avaliar também a evolução da capacidade de filtração de cada um dos FLAs ao longo do tempo, desde o início até o final da operação.

Por fim, uma amostra de aproximadamente 500 mL foi tomada durante a operação de cada FLA para uma análise laboratorial mais apurada. Dada sua complexidade, tal análise teve de ser realizada em laboratório externo à unidade industrial onde foram desenvolvidas as filtrações. Seu objetivo está em determinar se a operação de filtragem em cada um dos leitos testados introduziu na água elementos prejudiciais à saúde humana, notadamente compostos inorgânicos, uma vez que o chamote de porcelanato é composto essencialmente por estes referidos elementos. Dentre os muitos compostos inorgânicos, deu-se especial atenção ao monitoramento de arsênio, cádmio, chumbo, cobre, cromo, fluoretos, níquel, ferro, manganês e zinco – os sete primeiros foram escolhidos devido à sua periculosidade; já os demais foram selecionados por serem classificados como parâmetros de potabilidade da água pela legislação brasileira. Além da periculosidade ou da exigência imposta pela legislação, os elementos cobre, cromo, níquel, ferro e manganês estão presentes em corantes utilizados nos processos de fabricação de porcelanato, reforçando a importância de monitorar suas presenças na água filtrada em leito de chamote britado.

Com o devido tratamento estatístico, os resultados aqui obtidos permitirão tirar conclusões que, de fato, aprovarão ou condenarão o uso de chamote britado como elemento filtrante para o tratamento de água.

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 METODOLOGIA DE TRATAMENTO DOS DADOS

Todos os resultados obtidos passaram por tratamentos estatísticos realizados com o auxílio de softwares computacionais. Entre os muitos softwares disponíveis no mercado, utilizaram-se apenas dois: o MS Excel 2010 e o Statistica 7.0.

A análise dos dados tratados foi dividida em quatro etapas. A primeira delas diz respeito às caracterizações realizadas no início da pesquisa, abordando o chamote como revestimento cerâmico, como resíduo industrial, e como meio filtrante. A segunda contempla os ensaios efetuados para a caracterização da água bruta, bem como o ensaio para definição da quantidade ótima de agente coagulante. A terceira etapa, por sua vez, abrange os resultados obtidos durante as filtrações. E a etapa final envolve os resultados de qualidade da água filtrada, de modo a verificar se houve contaminação do líquido através do contato com os leitos filtrantes. Esta última etapa não apresenta tratamento de dados computacional, haja vista que os resultados já foram previamente trabalhados estatisticamente pelo laboratório executor das análises.

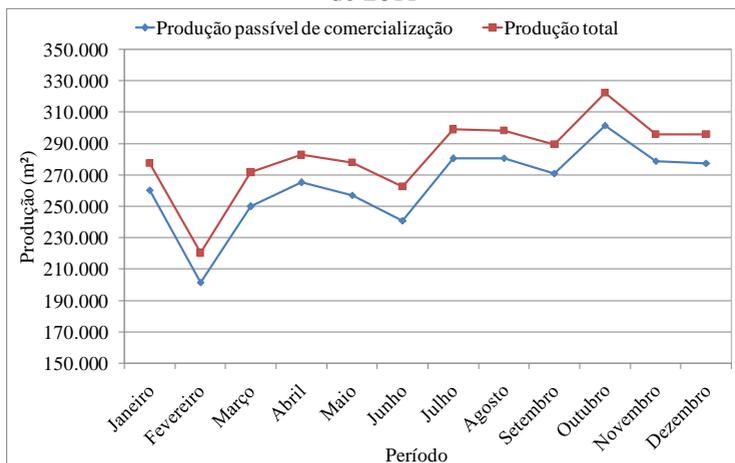
7.2 RESULTADOS OBTIDOS

7.2.1 Resultados das caracterizações prévias do chamote

a) Caracterização do chamote como produto cerâmico

O processo produtivo da unidade fabril no qual este trabalho de pesquisa foi desenvolvido foi acompanhado durante todo o ano de 2011. Inicialmente, executou-se um levantamento da produção de porcelanato; caso esta fosse muito pequena, o trabalho seria inviabilizado. Apurou-se que a empresa fabrica em torno de 280.000m²/mês de porcelanatos técnicos de diversos tamanhos, dos quais pouco mais de 260.000m²/mês em média são disponibilizados à comercialização. O restante é descartado em forma de quebra. O histórico de produção de 2011 pode ser verificado conforme o gráfico exposto na seqüência:

Figura 44 – Produção de porcelanatos da unidade fabril estudada no ano de 2011

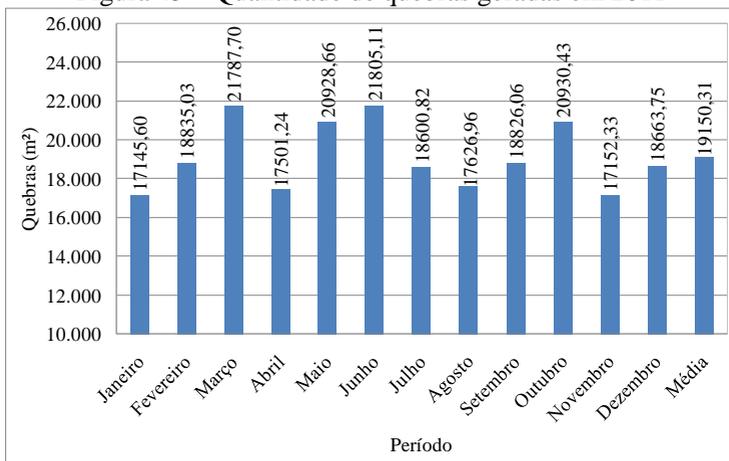


Fonte: Dados primários (2012)

Embora haja sazonalidade, em especial nos primeiros meses do ano, observa-se notadamente que há um aumento de produção na segunda metade de 2011. Isso comprova que há demanda para os materiais produzidos. De fato, conforme levantado por Menegazzo et. al. (2000), há uma forte tendência de aumento de demanda de revestimentos porcelânicos, e, mesmo passada uma década após tal conclusão, verifica-se com base nos dados produtivos colhidos que esta tendência do mercado continua atual.

Mesmo com as variações de produção, nota-se que o percentual de quebra é razoavelmente estável, de maneira que as linhas do gráfico apresentado anteriormente sejam praticamente equidistantes durante todo o ano. No ano de 2011, o percentual médio de quebra de material queimado – responsável pela geração do chamote – foi de 6,8% da produção total, o que equivale a pouco mais de 19.000m²/mês ou quase 230.000 m²/ano – isto é, praticamente a produção de um mês a cada ano é descartada em forma de chamote. O gráfico a seguir expõe com clareza a quantidade de quebras queimadas geradas mês a mês, durante o ano de 2011:

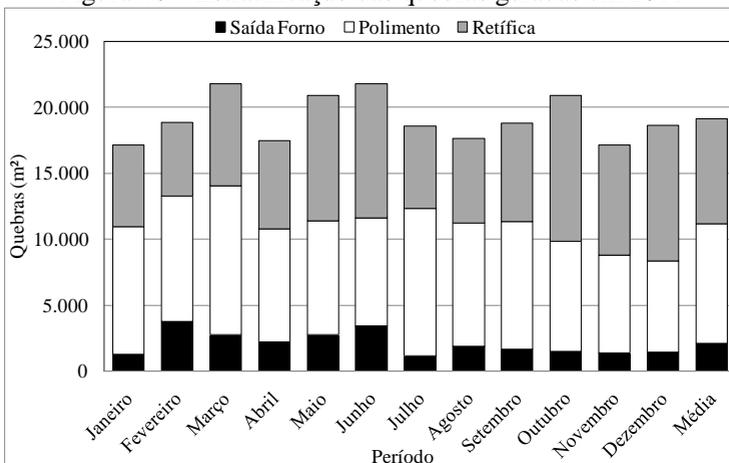
Figura 45 – Quantidade de quebras geradas em 2011



Fonte: Dados primários (2012)

Estratificando as quebras por setores do processo produtivo, apura-se que as etapas de polimento e retificação concentram 89% de todas as peças descartadas do processo. O gráfico na sequência ilustra bem tal constatação:

Figura 46 – Estratificação das quebras geradas em 2011



Fonte: Dados primários (2012)

Como os materiais filtrantes são comercializados em medidas mássicas, é necessário conhecer a massa de chamote que é gerada para que se possa concluir se há ou não quebras em quantia suficiente para viabilizar seu uso como elemento filtrante. Informações da empresa mostram que, em 2011, foram geradas 440.274kg/mês de quebras queimadas em média. Sabe-se que um pequeno filtro, como o empregado no tratamento de água pela empresa onde este estudo foi realizado, necessita de 1.500kg de areia para operar. Considerando que este filtro precisasse da exata quantia de chamote britado para atingir a mesma eficiência da areia, então a quantidade média mensal gerada de chamote seria suficiente para recheiar 293,5 filtros se não houvesse perdas. De fato, há material descartado em quantidade mais do que suficiente para viabilizar a produção de material filtrante.

Tendo traçado o panorama geral a respeito da geração de quebras, passa-se a concentrar esforços nas características cerâmicas do chamote. Estas características indicarão quão difíceis serão os trabalhos de britagem do chamote para transformá-lo em material filtrante. Neste sentido, avaliou-se a absorção de água, que dá ideia da quantidade de espaços vazios no interior da peça, e a resistência mecânica, que exhibe qual é a força necessária para quebrar o corpo cerâmico.

Para a obtenção dos resultados de ambos os ensaios, realizou-se um acompanhamento durante o primeiro semestre de 2011. A tabela na sequência resume os resultados, bem como os padrões de produção:

Tabela 8 – Ensaio de caracterização do porcelanato

Mês	Absorção de água (%)	Resistência à flexão (MPa)
Padrão	≤ 0,50	≥ 55,00
Janeiro/11	0,49	57,42
Fevereiro/11	0,35	61,99
Março/11	0,50	64,00
Abril/11	0,39	65,60
Mai/11	0,47	70,91
Junho/11	0,41	68,03
Média	0,44	64,66

Fonte: Dados primários (2012)

Conclui-se, com base no acompanhamento efetuado, que o material cerâmico analisado apresenta excelentes características técnicas, estando dentro dos padrões industriais de qualidade. Trata-se de um produto altamente compactado, com poucos espaços vazios e grande resistência a choques. De fato, o britador terá dificuldades para granulá-lo. Isso também justifica, assim como demonstrado por muitas literaturas, a ineficiência da etapa de moagem quando o chamote britado de porcelanato é retroalimentado ao início do processo produtivo como se fosse uma matéria-prima. Por outro lado, se for avaliado como sendo um material filtrante, o chamote granulado apresenta características semelhantes à areia lavada, já que a porosidade dos grãos de ambos é praticamente zero. O chamote também mostra boa resistência quanto a esforços mecânicos, o que é interessante, já que choques entre os grãos são inevitáveis durante a lavagem dos filtros.

b) Caracterização do chamote como resíduo industrial

A avaliação do chamote como subproduto de um processo de fabricação foi iniciada com a determinação de sua composição química. Esta foi realizada por meio de espectrometria de fluorescência de raios-X e de absorção atômica, com a ajuda de um laboratório especializado. O resultado da análise é expresso a seguir:

Tabela 9 – Composição química do chamote

Elemento	Teor (%)	Elemento	Teor (%)
Al ₂ O ₃	18,40	MnO	0,03
CaO	1,84	Na ₂ O	2,00
Fe ₂ O ₃	1,99	P ₂ O ₅	0,06
K ₂ O	2,15	SiO ₂	70,78
MgO	2,20	TiO ₂	0,55

Fonte: Senai SC (2011)

Segundo Shreve e Brink Jr (1997), a areia é composta basicamente por quartzo. Riella (2010) explica que “quartzo” é o nome atribuído aos minerais cuja composição química é dada basicamente por SiO₂. Unindo ambas as afirmações, chega-se ao denominador comum de

que a areia é formada basicamente por SiO_2 , óxido que compõe mais de 70% do chamote. Além dele, observa-se um percentual considerável de Al_2O_3 . Estes óxidos, que juntos constituem quase 90% da composição do chamote, são comuns em minerais e, por isso, não são preocupantes. Quanto aos demais óxidos, a presença de metais de alta toxicidade – como arsênio, cádmio, chumbo ou mercúrio – não foi observada.

Feito isto, o próximo passo seria a realização do ensaio de classificação de resíduo sólido proposto pela NBR 10004:2004. Este, que também foi executado com o auxílio de um laboratório externo, é dividido em etapas. Na primeira delas, avaliam-se características do resíduo sólido como inflamabilidade, corrosividade, reatividade e toxicidade. Os seguintes resultados foram obtidos:

Tabela 10 – Ensaio de classificação de resíduo sólido para o chamote

Característica	Resultado
Inflamabilidade	Não
Corrosividade	Não
Reatividade	Não
Toxicidade	Não

Fonte: IPEN/CNEN (2012)

Tendo negativas para todas as características avaliadas, realizou-se o ensaio de toxicidade, que apresentou os seguintes resultados:

Tabela 11 – Resultado do ensaio de toxicidade do chamote

Parâmetros	Resultado	Limite	Parâmetros	Resultado	Limite
	(mg/L)	(mg/L)		(mg/L)	(mg/L)
Arsênio	<0,001	1,0	Fluoreto	0,14	150,0
Bário	1,35	70,0	Mercúrio	<0,005	0,1
Cádmio	<0,001	0,5	pH	4,97	-
Chumbo	<0,001	1,0	Prata	<0,001	5,0
Cromo	0,013	5,0	Selênio	<0,001	1,0

Fonte: IPEN/CNEN (2012)

Estes dois primeiros ensaios classificaram o chamote como um resíduo não perigoso, de classe II. Porém, a norma divide os resíduos de classe II em inertes e não inertes, categorização que será dada em função do ensaio de solubilização. Os resultados deste estão aqui expressos:

Tabela 12 – Resultado do ensaio de solubilização do chamote

Parâmetros	Resultado (mg/L)	Limite (mg/L)
Alumínio	0,15	0,2
Arsênio	<0,001	0,01
Bário	0,554	0,7
Cádmio	<0,001	0,005
Chumbo	<0,001	0,01
Cianeto	<0,004	0,07
Cloreto	118	250
Cobre	0,019	2
Cromo	0,007	0,05
Fenol	<0,01	0,01
Ferro	0,179	0,3
Fluoreto	<0,05	1,5
Manganês	0,008	0,1
Mercúrio	<0,0005	0,001
Nitrato	<0,02	10
pH final	8,7	-
Prata	<0,0001	0,05
Selênio	<0,001	0,01
Sódio	49,2	200
Sulfato	31,9	250
Surfactantes	<0,05	0,5
Zinco	0,028	5

Fonte: IPEN/CNEN (2012)

O ensaio de solubilidade demonstrou que o chamote é, de fato, um resíduo de classe II B – não perigoso inerte. Tal categoria engloba todos os materiais que, uma vez em contato com água destilada ou deionizada, não solubilizam nenhum de seus constituintes a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água. Como todos os compostos avaliados estão abaixo do limite tolerável, conclui-se, por conseguinte, que não há risco de contaminação da água por materiais provenientes do chamote.

c) Caracterização do chamote como elemento filtrante

Para estudar o chamote britado tal qual um elemento filtrante, faz-se necessária a avaliação de algumas de suas propriedades, como: tamanho dos grãos; tamanho efetivo; coeficiente de desuniformidade; forma e geometria dos grãos; dureza; esfericidade; porosidade; massa específica. Primeiramente, a distribuição de tamanho de grãos foi determinada, conforme segue:

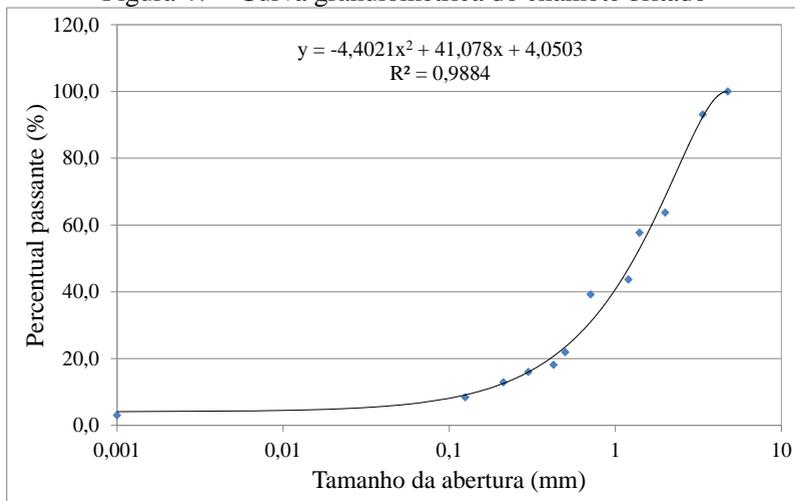
Tabela 13 – Classificação granulométrica do chamote britado

Malha (mesh)	Abertura (mm)	Retido (%)	Somatório dos retidos (%)
4	4,76	6,9	100
6	3,36	29,4	93,1
10	2	6	63,7
14	1,4	14	57,7
16	1,2	4,5	43,7
24	0,71	17,3	39,2
32	0,5	3,8	21,9
40	0,425	2,1	18,1
48	0,3	3,1	16
70	0,212	4,5	12,9
120	0,125	5,4	8,4
Prato	0,001	3	3
Total	-	100	-

Fonte: Dados primários (2012)

Com base na distribuição dos grãos obtida, traçou-se a curva granulométrica do chamote recém-britado, que assim se apresentou:

Figura 47 – Curva granulométrica do chamote britado



Fonte: Dados primários (2012)

Por fim, extraíram-se os demais resultados. A título de comparação, a tabela a seguir elenca estes resultados juntamente com os valores de alguns parâmetros extraídos da literatura para a areia:

Tabela 14 – Caracterização do chamote britado

Característica	Chamote	Areia
Tamanho efetivo - D_{10} (mm)	0,147	-
Coeficiente de desuniformidade	11,27	< 3,00
Forma e geometria dos grãos	Triturado	Agudo
Esfericidade	0,55	0,70-0,80
Porosidade	38,79	-
Massa específica (g/mL)	1,667	-
Dureza (Mohs)	5	7

Fonte: Dados primários (2012); Libânio (2008)

A maior parte das propriedades aqui apuradas é função direta da granulometria do elemento filtrante. Variando a quantia percentual de qualquer um dos tamanhos, as ditas propriedades também variarão, de modo a impedir que comparativos entre a areia e o chamote sejam traçados. O comparativo apenas poderá ser efetuado quando os leitos filtrantes de areia e de chamote britado estiverem prontos para entrar em operação. Tal observação se estende às seguintes propriedades: tamanho efetivo, coeficiente de desuniformidade, massa específica e porosidade. Isso, entretantes, não ocorre para a forma e geometria dos grãos, esfericidade e dureza, onde é possível efetuar o referido comparativo, uma vez que estas propriedades são características do material que compõe o leito filtrante, e não de sua distribuição granulométrica. É no comparativo destas características que se passa a focar a partir de então.

Quanto à forma e geometria dos grãos, que está diretamente relacionada à esfericidade, Libânio (2008) classifica os grãos de areia como “agudos”, com esfericidade variando entre 0,7 e 0,8. O chamote, por sua vez, apresenta forma de grão triturado e esfericidade bem menor do que a areia – em torno de 0,55. Conforme lembra Di Bernardo (1993), grãos irregulares demonstram melhor desempenho de filtração; já grãos esferoidais facilitam a lavagem do meio e proporcionam menor perda de carga. Com base nisto, há a expectativa de que o chamote seja mais eficaz na remoção de impurezas, já que sua forma é essencialmente irregular, ao passo que se espera que a areia apresente menor perda de carga no leito. No que tange à avaliação da dureza, nota-se que a areia, composta basicamente por quartzo conforme mostra Shreve e Brink Jr (1997), apresenta dureza em torno de 7 na escala Mohs, enquanto o chamote alcançou apenas 5 na mesma escala. Relembrando Di Bernardo (2003), a dureza está relacionada com a resistência à abrasão; quanto maior a dureza, menor é o desgaste dos grãos na fluidificação e expansão do leito durante a operação de limpeza. Assim sendo, o chamote é mais suscetível ao desgaste durante a operação de limpeza do leito do que a areia. À luz desta informação, se ambos os elementos filtrantes forem empregados em filtros industriais que operem em condições similares, a substituição por desgaste do leito de chamote britado se dará antes do leito de areia.

Passando as características que estão em função da distribuição granulométrica do leito filtrante – tamanho efetivo, coeficiente de desuniformidade, massa específica e porosidade – nota-se que poucas conclusões podem ser tiradas com as medições realizadas, pois as

medições foram realizadas no chamote britado bruto. E dificilmente o chamote poderá ser utilizado em um sistema de filtração estando em seu estado bruto. É preciso que haja uma classificação granulométrica prévia, assim como as empresas de saneamento fazem com a areia extraída da natureza. Ainda que o chamote britado pudesse ser empregado “in-natura” em sistemas de filtração, um comparativo frente à areia não seria possível de ser realizado, já que a areia não foi adquirida em estado bruto, mas devidamente classificada por faixa de tamanho de grão. Contudo, dentre as características levantadas do chamote britado “in-natura”, há apenas uma que é passível de análise: o coeficiente de desuniformidade. Libânio (2008) explica que para filtração direta, a legislação brasileira exige que o filtro trabalhe com coeficiente de desuniformidade inferior a 3,0 e quanto mais próximo de zero, mais uniforme é o meio e mais profundamente as impurezas penetram. O chamote britado em estado bruto apresenta valor superior a 11,2 – muito superior a 3,0. Por isso, a configuração granulométrica do chamote britado “in-natura” tende a ser muito eficiente na remoção de impurezas.

Ao contrário do coeficiente de desuniformidade, as demais características dos leitos filtrantes dependentes da distribuição granulométrica (tamanho efetivo; massa específica; e porosidade) não permitem a retirada de conclusões com base nos dados do chamote britado “in-natura”. Para ganharem sentido, tais informações precisam ser mensuradas nos leitos filtrantes que de fato serão empregados, isto é, nas formulações fina, média e grossa que foram desenvolvidas para operar no interior dos FLAs, tanto para a areia, quanto para o chamote britado. Assim, um comparativo entre ambos os materiais filtrantes pode ser traçado e conclusões a respeito da eficiência de filtração e limpeza poderão ser tiradas.

Entretanto, algumas destas características, como diâmetro efetivo e coeficiente de desuniformidade não puderam ser mensuradas nos leitos filtrantes. As diferentes granulometrias propostas por Di Bernardo (2003) para uso laboratorial apresentam tamanhos de grãos muito próximos e, portanto, não se dispunha de peneiras adequadas para classificá-las. Assim, apenas os diâmetros mínimo/máximo, bem como a porosidade (ϵ) e a massa específica foram mensurados. O resultado é um bom indicativo de eficiência – tanto de filtração, quanto de limpeza – para as formulações de leito filtrante empregadas neste trabalho de pesquisa:

Tabela 15 – Caracterização dos meios filtrantes

Formula	Meio	D _{min} (mm)	D _{máx} (mm)	ε	M. esp. (g/mL)
Média	Chamote	0,30	1,40	0,42	1,27
	Areia	0,25	1,68	0,31	1,67
Grossa	Chamote	0,30	1,40	0,38	1,25
	Areia	0,25	1,68	0,30	1,67
Fina	Chamote	0,30	1,40	0,39	1,22
	Areia	0,25	1,68	0,31	1,60

Fonte: Dados primários (2012)

Conforme se observa na tabela, os diâmetros máximos e mínimos da areia e do chamote são diferentes, devido ao emprego de peneiras de classificação granulométrica distintas para cada material filtrante. Enquanto o chamote foi peneirado em telas com abertura de 0,30mm, 0,42mm, 0,71mm e 1,4mm, a areia foi classificada com peneiras de abertura de 0,25mm, 0,42mm, 0,84mm e 1,68mm. Dada a proximidade entre as aberturas das telas empregadas na classificação de um e outro material, não se considerou este fato como sendo uma significativa fonte de erros experimentais.

Quanto à porosidade dos leitos, esperava-se que tanto areia quanto chamote apresentassem valores maiores para este parâmetro. Observa-se, contudo, que a porosidade da areia sempre foi menor do que a do chamote, denotando assim uma maior compactação dos grãos. A princípio, portanto, a areia deve reter com maior facilidade os flocos de sujeira do que o chamote britado.

Por fim, nota-se que o chamote apresenta menor massa específica do que a areia, independentemente de formulação granulométrica. Em todos os casos, a massa específica do chamote ficou em torno de 1,25g/mL, enquanto a areia mostrou massas específicas em torno de 1,60g/mL. As formulações de areia estão muito mais compactadas do que as de chamote e, por isso, apresentam porosidades menores. Espera-se, portanto, que a areia seja realmente mais eficiente do que o chamote na remoção de impurezas. Outra conclusão pertinente diz respeito à limpeza dos leitos filtrantes. A areia, devido à sua maior massa específica, demanda maior pressão de água para fluidificar o leito

durante a operação de limpeza, enquanto o chamote é fluidificado com muito mais facilidade.

7.2.2 Resultados da coleta e preparação da água a filtrar

Dando prosseguimento aos trabalhos de caracterização que antecedem as filtrações em laboratório, passa-se a avaliar as propriedades da água empregada no desenvolvimento deste trabalho de pesquisa. Apurou-se que a água bruta apresentava as seguintes características no momento de sua coleta:

Tabela 16 – Principais características da água bruta

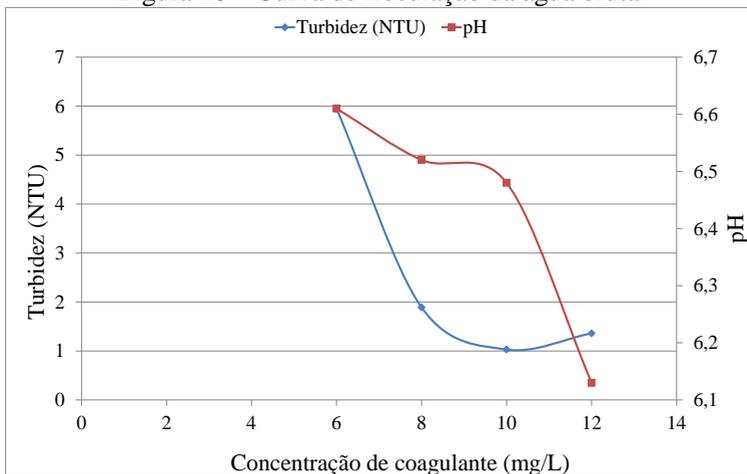
Característica	Valor
Turbidez (NTU)	4,9
pH	6,94
Alcalinidade (mg/L)	14
Cor (uH)	40

Fonte: Dados primários (2012)

Trata-se, portanto, de uma água de baixa turbidez, praticamente neutra em termos de pH e com baixa cor verdadeira. Embora a água bruta não tenha sido submetida a uma caracterização química mais apurada, pode-se afirmar, grosso modo, com base nos dados coletados que a mesma apresenta potencialidade ao consumo humano. A referida caracterização química da água bruta não foi realizada, pois o intuito desta pesquisa é avaliar a eficiência de filtração de leitos filtrantes de areia e de chamote de porcelanato britado. Entretanto, ressalta-se que tal análise seria imprescindível se o objetivo deste trabalho consistisse na avaliação do manancial de água bruta com o intuito de empregá-lo para abastecimento e consumo humano.

Além dos ensaios anteriormente citados, também foi realizado um teste de jarro, que serve de parâmetro para a avaliação da capacidade de coagulação da água bruta à medida que se varia a concentração de agente coagulante no meio aquoso. Quando uma amostra de água “in-natura” foi submetida ao teste de jarro, obteve-se como resultado o seguinte diagrama:

Figura 48 – Curva de floculação da água bruta



Fonte: Dados primários (2012)

Tendo o gráfico por base, nota-se a ocorrência de um ponto de mínima na curva de turbidez quando a concentração de sulfato de alumínio é de 10mg/L, ponto este que identifica a dosagem ótima de agente coagulante. É interessante verificar também que há uma queda suave do pH da água entre as concentrações de 6 a 10mg/L de sulfato de alumínio e, a partir de então, a queda de pH torna-se mais acentuada. Mancuso e Santos (2003) mostram que a adição de sais de alumínio – e em especial do sulfato de alumínio – à água gera, entre outros compostos, a formação de íons $(\text{SO}_4)^{2-}$ e, por conseguinte, de ácido sulfúrico, o que reduz o pH da água. Por isso, o controle na dosagem de sulfato de alumínio deve ser primordial.

Haja vista as informações levantadas pelo teste de jarro, conclui-se que a concentração de 10mg/L é, de fato, a dosagem ótima de agente coagulante, pois garante uma diminuição considerável de turbidez sem diminuir demasiadamente o pH da água. Justifica-se, portanto, o emprego de tal concentração de sulfato de alumínio no pré-tratamento da água bruta antes de submetê-la a filtração em laboratório.

7.2.3 Resultados da eficiência de filtração

Tendo terminado a explanação a respeito dos resultados das caracterizações prévias, pode-se passar às filtrações em laboratório.

Conforme relatado no capítulo 6, a eficiência de filtração seria avaliada levando-se em conta cinco parâmetros: turbidez, pH, vazão (de entrada e saída) e tempo de operação do filtro. Cada qual recebeu um tratamento estatístico distinto, conforme se aborda mais aprofundadamente a seguir:

7.2.3.1 Turbidez

Insosfismavelmente, a turbidez é o parâmetro mais importante a ser controlado. Conhecer-se-á a eficiência de filtração através da redução de turbidez após a filtração.

A primeira análise a ser feita, diz respeito ao comportamento da turbidez ao longo do tempo. Com o auxílio do software Statística 7.0, confeccionou-se um gráfico para cada batelada de filtração, relacionando a turbidez de saída frente o tempo de operação do filtro, os quais estão expostos no apêndice A.

Com exceção de três bateladas, todas as filtrações apresentam uma tendência de redução de turbidez ao longo do tempo de operação, independentemente de tipo de elemento filtrante ou granulometria empregados. As três bateladas que não demonstraram tendência à diminuição de turbidez foram a 1ª batelada de areia da formulação granulométrica média, 2ª batelada de chamote da formulação granulométrica grossa e a 2ª batelada de chamote da formulação granulométrica média. Esta última apresentou um comportamento estável enquanto as duas primeiras mostraram uma tendência ascendente de turbidez ao longo do tempo de operação. Estes erros se devem ao próprio turbidímetro e a manipulação das amostras. O turbidímetro é um aparelho extremamente sensível, de modo que qualquer pequena sujeira pode alterar sua leitura. No que tange a manipulação das amostras, pode-se citar como causas de erro a ineficiência do sistema de proteção contra pó, realizado com lâminas de papel alternadas com lâminas de plástico. Por não apresentarem correlação com os demais resultados obtidos, as bateladas em questão não foram consideradas na análise de variação da turbidez ao longo do tempo.

Com exceção das bateladas supracitadas, nota-se nos gráficos do apêndice A que o início da filtração é marcado por uma alta turbidez da água filtrada, fenômeno diretamente relacionado à limpeza do filtro. Durante a operação de limpeza do leito filtrante, a água é impelida com grande pressão em fluxo ascendente com o propósito de fluidificar o elemento filtrante de maneira a desprender os flocos de sujeira aderidos

aos seus grãos. Por ineficiência da operação, parte destes flocos não conseguiu ser arrastado pela água de limpeza. Entre as possíveis fontes causadoras da ineficiência da operação de limpeza, citam-se: (a) a formação de caminhos preferenciais no interior do leito, proveniente da má compactação deste ou das características construtivas do filtro; (b) a formação de zonas mortas, como ocorre aos grãos de elemento filtrante assentados na parte mais inferior do filtro, sobre o cap, onde a água de limpeza não consegue atingi-los; (c) a ausência de pressão adequada da água de limpeza; e (d) o tempo de retrolavagem, embora indicado na literatura, talvez não tenha sido suficiente. Outra justificativa para a maior turbidez no início do processo e que também está relacionada à limpeza do leito diz respeito aos choques sofridos pelos grãos do elemento filtrante durante a fluidificação. Estes choques podem provocar o desgaste dos grãos de elemento filtrante e, por conseguinte, liberar partículas no início da filtração.

Independentemente do motivo, conforme se pode observar na tabela a seguir, as filtrações realizadas em chamote britado tendem a liberar menos agentes causadores de turbidez no startup do filtro do que as filtrações conduzidas em areia:

Tabela 17 – Turbidez média (NTU) da primeira amostragem de filtração

Formulação granulométrica	Chamote	Areia
Média	1,09	1,37
Grossa	1,08	2,06
Fina	1,55	3,73

Fonte: Dados primários (2012)

Verifica-se, portanto, que a média da primeira amostragem de todas as formulações granulométricas do chamote britado é menor em todos os casos se comparada à areia. O chamote britado, por apresentar menor massa específica, fluidifica mais facilmente do que a areia e, por isso, desprende a sujeira aderida ao seu leito com maior facilidade – o que resulta em menores emissões de partículas causadoras de turbidez no startup do filtro. Entretanto, este fato pode ser indesejável no tocante à vida útil do leito. A menor massa específica, aliada à menor dureza na escala Mohs, leva a concluir que o leito de chamote britado tende a desgastar-se mais rapidamente do que o leito de areia. A veracidade

dessa conclusão, porém, não pode ser comprovada com apenas 15 filtrações em laboratório. É necessária a realização de estudos mais aprofundados a respeito e, se comprovado o maior desgaste do leito de chamote britado, será necessário redefinir os parâmetros operacionais de retrolavagem para o mesmo.

À medida que o tempo de operação do filtro de laboratório avança, observa-se uma tendência à diminuição de turbidez, haja vista que os poros do leito vão ficando cada vez mais entupidos de modo a restringir cada vez mais a passagem de flocos de sujeira – e isto se estende tanto aos leitos de chamote britado, quanto aos leitos de areia.

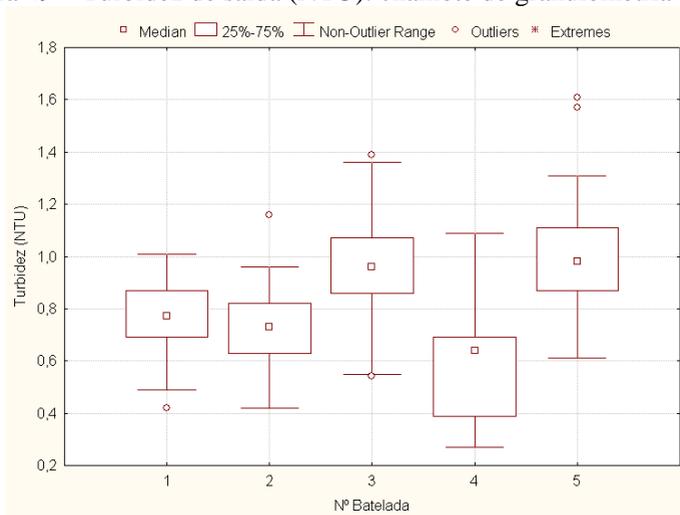
Sob o ponto de vista técnico, a análise da variação de turbidez da água filtrada ao longo do tempo de operação do FLA é interessante, pois identifica o perfil de funcionamento dos filtros de laboratório para a variável em questão. Contudo, a referida análise é insuficiente para a avaliação da eficiência de filtração de cada um dos leitos filtrantes testados. Para melhor avaliar a eficiência de filtração, lançou-se mão de outra análise, empregando uma velha e bastante eficaz ferramenta estatística: o boxplot.

Além de demonstrar a variabilidade amostral, o emprego do boxplot também é útil na identificação de “outliers” (ou pontos discrepantes) que, uma vez identificados, serão eliminados para não influenciarem de maneira negativa às conclusões. Eliminado os “outliers”, podem-se verificar quão eficientes as filtrações foram na remoção de turbidez das amostras de água ensaiadas. Para a confecção dos gráficos, foi empregado o software Statística 7.0, que possui ferramentas específicas para a requerida aplicação.

Diferentemente do ocorrido na avaliação dos gráficos sequenciais de turbidez x tempo de operação, onde cada batelada de filtração gerou uma carta de controle, a confecção dos boxplots foi múltipla. As cinco bateladas de cada formulação granulométrica de cada um dos materiais filtrantes estudados foram condensadas em um gráfico. Deste modo, foram gerados apenas três gráficos para areia e outros três para o chamote britado, onde cada gráfico contempla todos os ensaios de turbidez efetuados naquela referida formulação granulométrica do referido material filtrante. Isso permitiu a compilação de muita informação em poucas ilustrações.

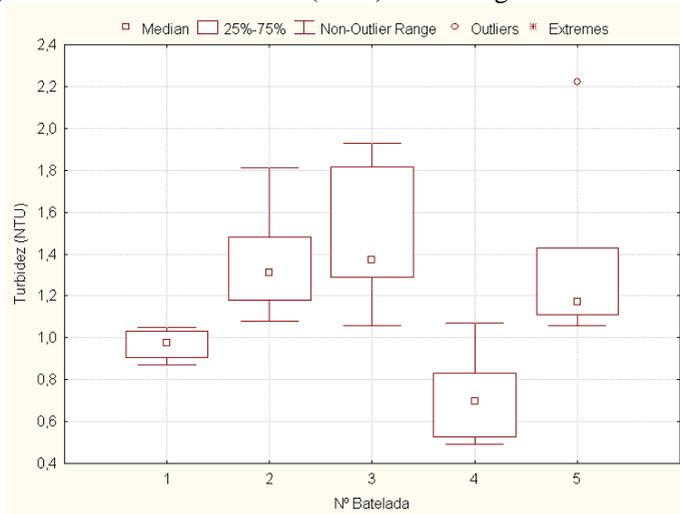
Assim sendo, na seqüência expõem-se os boxplots obtidos no tratamento de dados para a formulação granulométrica média:

Figura 49 – Turbidez de saída (NTU): chamote de granulometria média



Fonte: Dados primários (2012)

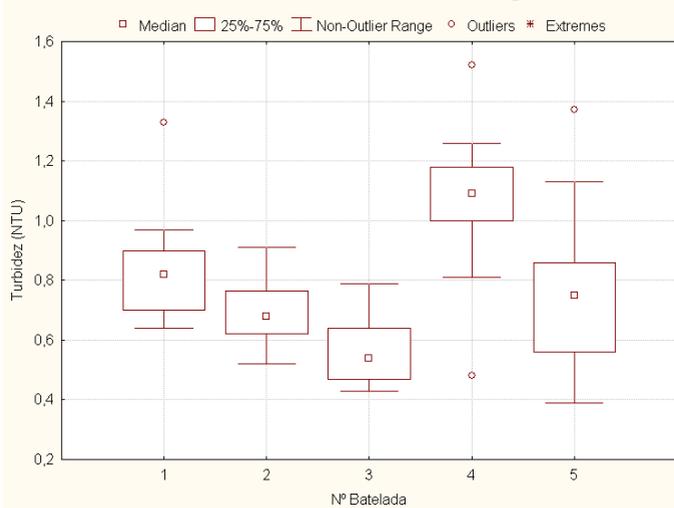
Figura 50 – Turbidez de saída (NTU): areia de granulometria média



Fonte: Dados primários (2012)

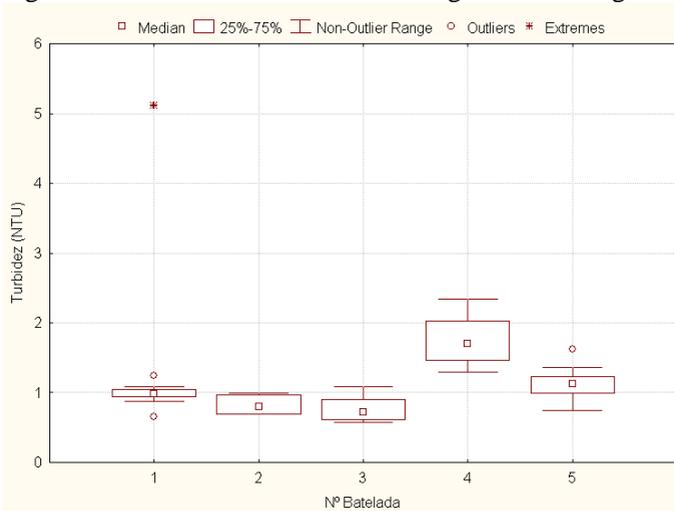
Para a formulação granulométrica grossa, obteve-se:

Figura 51 – Turbidez de saída (NTU): chamote de granulometria grossa



Fonte: Dados primários (2012)

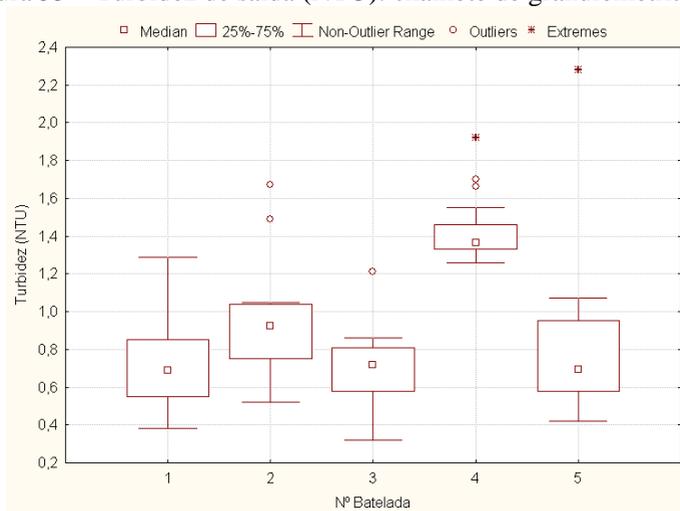
Figura 52 – Turbidez de saída: areia de granulometria grossa



Fonte: Dados primários (2012)

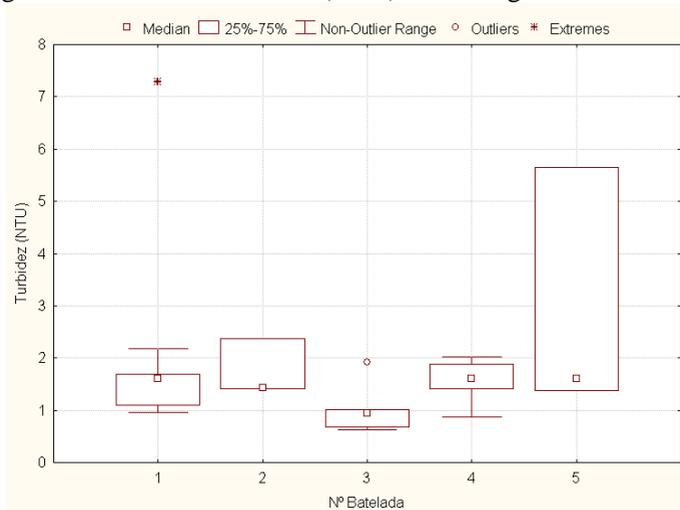
Do mesmo modo, a formulação granulométrica fina apresentou-se do seguinte modo:

Figura 53 – Turbidez de saída (NTU): chamote de granulometria fina



Fonte: Dados primários (2012)

Figura 54 – Turbidez de saída (NTU): areia de granulometria fina



Fonte: Dados primários (2012)

A avaliação global dos gráficos revela que, em todos os casos e em todas as amostragens, o leito filtrante de chamote britado removeu

mais turbidez do meio aquoso do que o leito de areia. Além disso, os dados de turbidez para o leito de chamote britado são mais bem distribuídos, denotando uma menor variabilidade de turbidez. De modo geral, as medianas das amostras filtradas no leito de chamote britado estão posicionadas no meio da distribuição, enquanto as amostras filtradas em leito de areia mostram medianas excêntricas. Este fato ratifica que as amostras filtradas no leito de chamote britado seguem mais fielmente a uma distribuição normal do que àquelas filtradas em leito de areia.

Observa-se ainda que em todos os casos, as filtrações em leito de chamote britado apresentaram mais “outliers” do que àquelas realizadas em leito de areia. Este fato é explicado pelo número de amostragens, já que em todas as oportunidades o filtro recheado com chamote britado operou por mais tempo do que o filtro que continha areia. Há casos, como ocorrido com as amostras filtradas na formulação granulométrica mais fina de areia, em que os gráficos foram confeccionados utilizando apenas três pontos, pois o filtro não foi capaz de operar por mais de uma hora sem colmatar.

Ainda que os boxplots possam embasar muitas conclusões, não se pode proceder a uma correta avaliação da eficiência de cada filtração com bases nos gráficos apresentados. Isto se dá porque a turbidez da água que adentrava aos filtros variava de batelada para batelada de filtração. A água bruta, antes de ser submetida à filtração, era pré-tratada em laboratório. Terminado o pré-tratamento, essa água tinha sua turbidez e pH medidos antes de ser alimentada aos filtros. Por erros experimentais de diversas naturezas, a turbidez da água ao final do pré-tratamento oscilou entre 1,13 e 2,67 NTU. As filtrações que fossem conduzidas com água pré-tratada de menor turbidez nitidamente tenderiam a apresentar melhores resultados em termos de turbidez da água filtrada do que àquelas conduzidas com água pré-tratada de maior turbidez. Esta sistemática induz a erros de interpretação dos dados, afinal, a eficiência de filtração é dada em função da redução de turbidez que o meio aquoso sofre ao passar por um leito filtrante, e não dada unicamente pelo valor da turbidez da água na saída do filtro. Desta maneira, filtrações que retiraram muitas partículas geradoras de turbidez do meio aquoso podem ser erroneamente classificadas como ineficientes porque a sua turbidez de saída foi maior do que a apresentada por outras filtrações. Para solucionar impasses deste tipo e permitir a correta avaliação da eficiência de filtração, é preciso levar em conta a turbidez

da água pré-tratada que foi alimentada ao filtro. Por isso, optou-se por avaliar a eficiência de filtração através da análise do percentual de remoção da turbidez, calculada conforme a equação (2):

$$R = \frac{T_o - T_f}{T_o} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

R = remoção de turbidez (%);

T_o = turbidez da água antes da filtração (NTU);

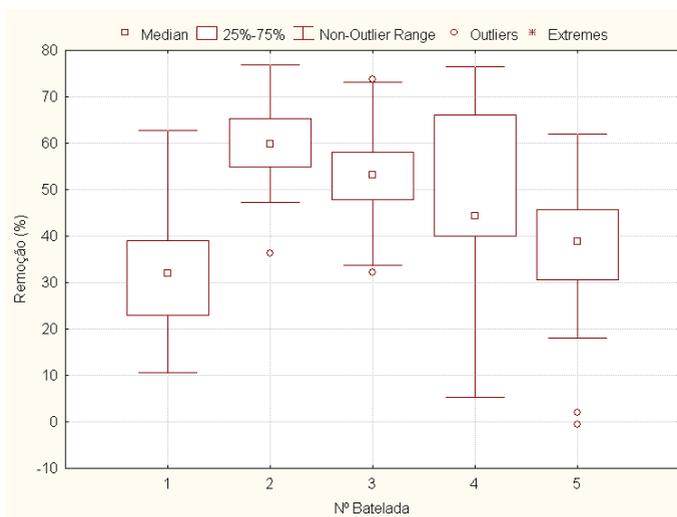
T_f = turbidez da água após a filtração (NTU).

O percentual de remoção de turbidez, calculado pela equação (2), leva em consideração a turbidez removida pelo filtro em relação à turbidez inicial da água pré-tratada em termos percentuais. Por meio deste índice matemático, quaisquer bateladas poderão ser comparadas umas as outras, já que todas estarão em termos percentuais. Desta forma, podem-se determinar quais filtrações foram as mais eficientes.

Calculados os percentuais de remoção, os mesmos foram plotados em boxplots, do mesmo modo como fora procedido com a turbidez. É interessante lembrar que a seleção do boxplot como meio estatístico para o tratamento dos dados levou em consideração justamente a sua capacidade de detectar e eliminar pontos discrepantes (“outliers”), de modo a garantir que estes não influirão nas conclusões. Mas mesmo não levando em conta os pontos discrepantes, a simples presença de tais pontos pode prejudicar a análise gráfica. Os boxplots têm por característica posicionar os pontos discrepantes acima ou abaixo do diagrama de caixa. Quando os pontos discrepantes ficam muito além ou aquém da escala do gráfico, o software Statistica 7.0 amplia o eixo das ordenadas para que o ponto possa ser exibido na ilustração. Como consequência, as caixas dos diagramas ficam distorcidas. Para evitar este problema, sempre que se notou a presença deste tipo de ponto discrepante (nomeados pelo software Statistica 7.0 como “extremos”), procedeu-se a eliminação do mesmo do seio dos dados, de maneira a evitar a ocorrência de distorções que prejudicassem a análise dos dados.

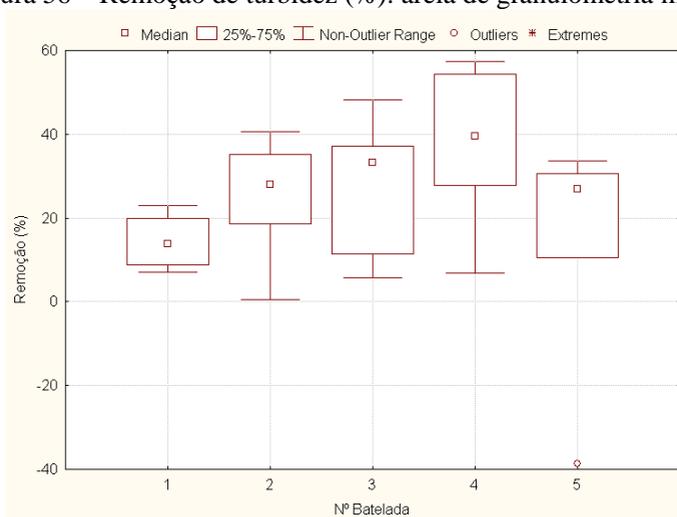
Assim, expõem-se a seguir os gráficos de remoção de turbidez já devidamente retrabalhados sem a presença de “outliers extremos”, a iniciar pelos leitos filtrantes da formulação granulométrica média:

Figura 55 – Remoção de turbidez (%): chamote de granulometria média



Fonte: Dados primários (2012)

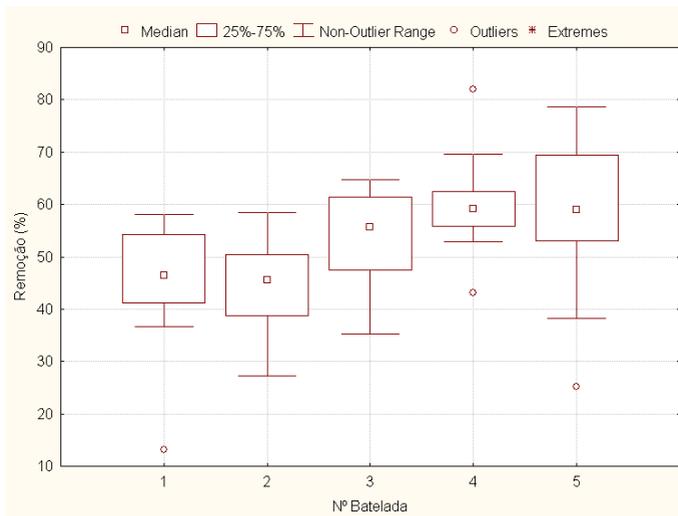
Figura 56 – Remoção de turbidez (%): areia de granulometria média



Fonte: Dados primários (2012)

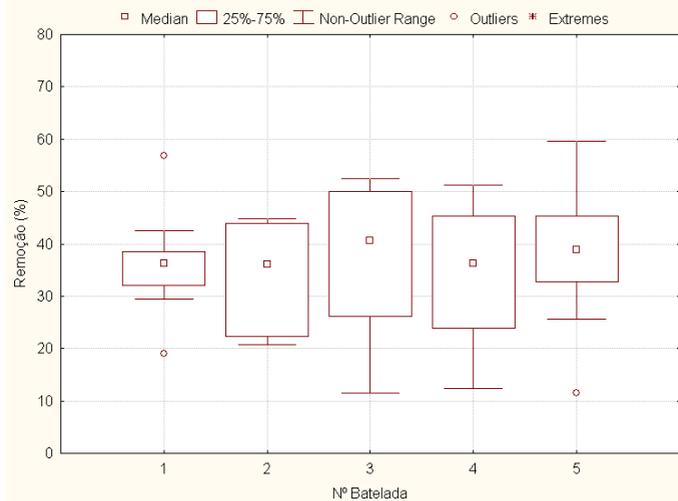
Para as amostras filtradas em leito de formulação grossa, tem-se:

Figura 57 – Remoção de turbidez (%): chamote de granulometria grossa



Fonte: Dados primários (2012)

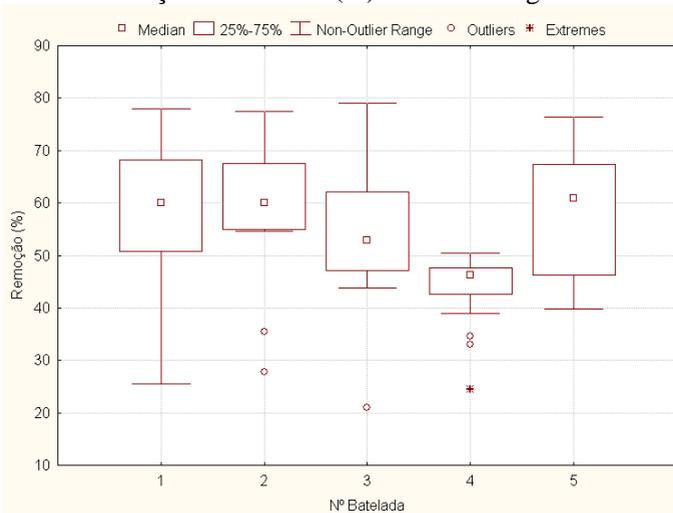
Figura 58 – Remoção de turbidez (%): areia de granulometria grossa



Fonte: Dados primários (2012)

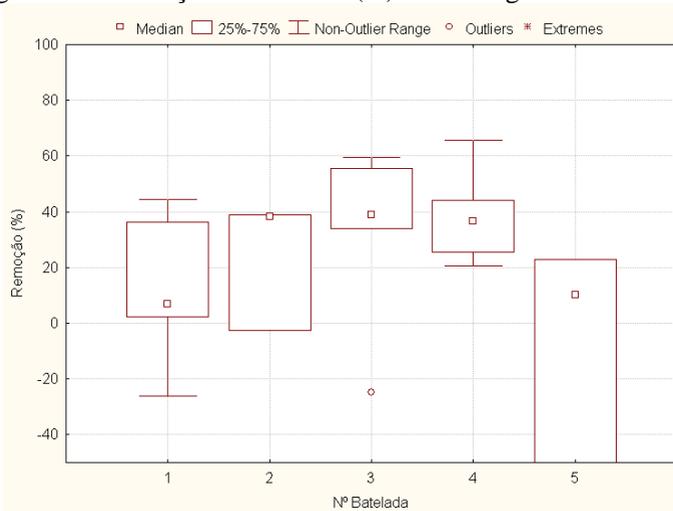
Enfim, para as amostras filtradas em leito de formulação granulométrica fina, alcançou-se:

Figura 59 – Remoção de turbidez (%): chamote de granulometria fina



Fonte: Dados primários (2012)

Figura 60 – Remoção de turbidez (%): areia de granulometria fina



Fonte: Dados primários (2012)

Antes de se iniciar as análises dos dados, é mister fazer um adendo quanto ao último gráfico, referente à filtração em leito de areia

de formulação granulométrica fina: as 2^a e 5^a filtrações foram conduzidas por apenas uma hora, devido ao entupimento prematuro do leito filtrante. Esta única hora de trabalho permitiu que se coletassem somente três amostragens – o que, do ponto de vista estatístico, é insuficiente para a confecção dos boxplots. O resultado disto foram gráficos atípicos, dos quais não é possível tirar-se conclusões. Logo, tais filtrações, embora expostas, não foram consideradas na avaliação da remoção de turbidez.

Quanto à análise dos dados de remoção, verificou-se que os leitos filtrantes de chamote britado apresentaram melhores desempenhos do que os leitos de areia em todos os casos, independentemente da formulação granulométrica empregada. As medianas dos diagramas do chamote britado, representadas no boxplot por meio de um quadrado pequeno dentro da caixa do gráfico, apresentaram valores maiores em todos os casos se comparadas às medianas obtidas nos leitos de areia – evidenciando o melhor desempenho dos leitos de chamote britado. Excetuando-se os valores discrepantes, tem-se que a maior remoção promovida por um leito filtrante de chamote britado entre todas as amostras coletadas foi de aproximadamente 79%, observada na 3^a filtração da formulação granulométrica fina, frente a uma remoção máxima de pouco mais de 65% conseguida por um leito de areia, verificada na 4^a filtração da formulação granulométrica fina.

Abordando a distribuição de valores, sabe-se a caixa principal do boxplot demonstra a distribuição de valores entre o primeiro e terceiro quartis, de forma que quanto menor o tamanho da caixa, mais concentrados estarão os valores de turbidez entre estes quartis. Embora a distribuição dos dados de turbidez tenha sido razoavelmente igual para ambos os materiais filtrantes, ou seja, as caixas dos diagramas apresentaram praticamente o mesmo tamanho tanto nas filtrações conduzidas em leitos de chamote britado quanto em leito de areia, percebe-se que as caixas dos boxplots dos leitos de chamote britado estão situadas em pontos mais elevados do eixo das ordenadas, eixo este que representa o percentual de remoção de turbidez. Isto reforça a maior eficiência dos leitos de chamote britado na eliminação de partículas causadoras de turbidez à água.

Quanto aos “outliers”, novamente é perceptível que as filtrações conduzidas em leito de chamote britado produziram mais pontos discrepantes do que aquelas realizadas em leito de areia. Assim como fora explanado durante a análise dos gráficos de turbidez, a pequena

quantia de amostras coletadas constitui a principal causa para tal, afinal os filtros operados com leito de chamote britado trabalharam por mais tempo do que aqueles operados com leito de areia em todas as oportunidades.

Em ambos os materiais filtrantes analisados, percebe-se que a granulometria mais fina é mais eficiente na remoção de turbidez se comparada às demais, conforme consta na literatura. Dentre as demais, as formulações que privilegiaram os grãos de maior tamanho apresentaram leve vantagem em termos de remoção se comparada às formulações granulométricas médias. Além disso, tanto para o leito de areia quanto para o leito de chamote britado, as filtrações em grãos grossos apresentaram-se mais estáveis, com menores variações entre as medianas de suas diversas bateladas. A explicação está na porosidade dos leitos. De acordo com as caracterizações prévias, areia e chamote britado apresentaram porosidades menores nos leitos de formulação grossa do que nos de média. No caso do chamote britado, a porosidade do leito mais grosseiro é de 0,375 frente a 0,427 do leito rico em grãos médios. Já para a areia, a formulação grossa tem porosidade de 0,300 contra 0,308 da formulação média. Conclui-se, portanto, que a distribuição de grãos escolhida para uso na formulação média não foi adequada tanto para a areia quanto para o chamote britado no que tange a remoção de turbidez. Isso, contudo, não é significativo, já que a meta deste trabalho de pesquisa não é determinar a melhor distribuição granulométrica, mas comparar em laboratório a eficiência de remoção de turbidez de leitos de areia e de chamote britado – e nisto, o leito de chamote britado mostrou-se melhor do que o de areia em todas as configurações granulométricas testadas.

Avaliando os resultados de modo global, percebe-se que mesmo tendo maior porosidade do que o leito de areia em todas as formulações granulométricas testadas, o leito de chamote britado conseguiu ser mais eficiente na remoção de turbidez e mostrou maior efetividade dos mecanismos de filtração do que seu concorrente. Além da maior eficiência na remoção de turbidez, grande parte em virtude de sua forma irregular que restringe a passagem de partículas com maior efetividade, os leitos de chamote britado exigem menor pressão de água para serem fluidificados durante a operação de limpeza devido à sua menor massa específica. À luz dessas conclusões, torna-se evidente o potencial que o chamote britado de porcelanato tem para a utilização como leito filtrante. Entretanto, faz-se necessária a avaliação das demais variáveis

envolvidas para que o potencial do chamote britado possa ser ratificado. É o que se propõe a fazer nas seções seguintes.

7.2.3.2 pH

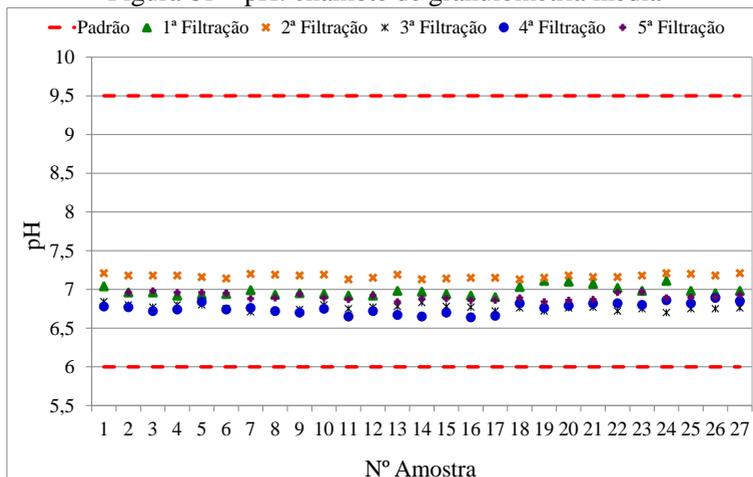
O pH é um fator importante no tratamento de água, expondo o caráter ácido-base do meio líquido. Mais do que isso, o pH é um indicador que mostra se o processo de coagulação transcorreu adequadamente – e essa foi a principal motivação para o seu controle neste trabalho de pesquisa.

O controle do pH, porém, não necessita ser estritamente rígido; para possibilitar o consumo humano, basta que se apresente dentro de uma faixa de tolerância. A portaria do Ministério da Saúde do Brasil MS nº 2914 de 12/12/11 recomenda que a água para consumo humano seja distribuída com pH entre 6,0 e 9,5.

A faixa de pH sugerida pelo Ministério da Saúde foi utilizada como base para o estudo desenvolvido neste trabalho. Nas estações de tratamento para abastecimento público, é conveniente submeter à água à desinfecção logo após a filtração – processo que proporciona um leve aumento ao pH à água. Como o padrão definido pela portaria em questão é recomendado à água pronta para o consumo, após a desinfecção, é interessante que o pH da água filtrada esteja no limite inferior deste range. Assim, certamente após ser submetida à desinfecção, a água atenderá aos padrões da legislação.

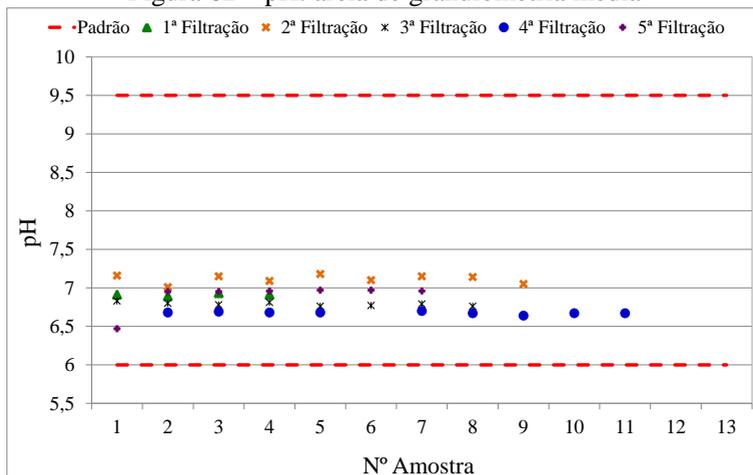
Neste estudo, a avaliação do pH se deu por meio de gráficos seqüenciais de pH x tempo de operação, obtidos com a ajuda do software MS Excel 2010. Semelhantemente ao que ocorrera aos gráficos de remoção de turbidez, onde muita informação foi sintetizada em uma única carta, cada gráfico aqui exposto resume o comportamento do pH de cada uma das amostragens de cada uma das filtrações realizadas em um certo elemento filtrante de determinada formulação granulométrica. Assim, geraram-se seis gráficos, sendo três para os leitos de chamote britado e outros três para os leitos de areia. Nestes gráficos, os resultados de cada filtração são representados por um caractere característico, enquanto a linha tracejada exhibe o padrão definido pela portaria MS nº 2914 de 12/12/11 do Ministério da Saúde. Os pontos discrepantes (“outliers”), determinados pelos mesmos critérios utilizados na confecção de gráficos do tipo boxplot, foram desconsiderados.

Figura 61 – pH: chamote de granulometria média



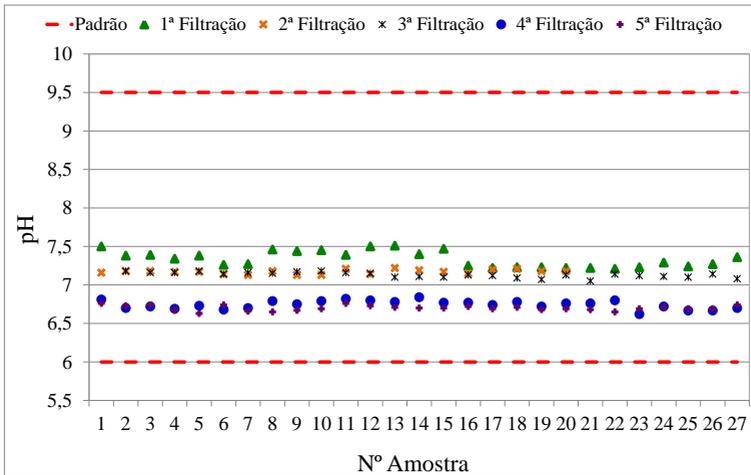
Fonte: Dados primários (2012)

Figura 62 – pH: areia de granulometria média



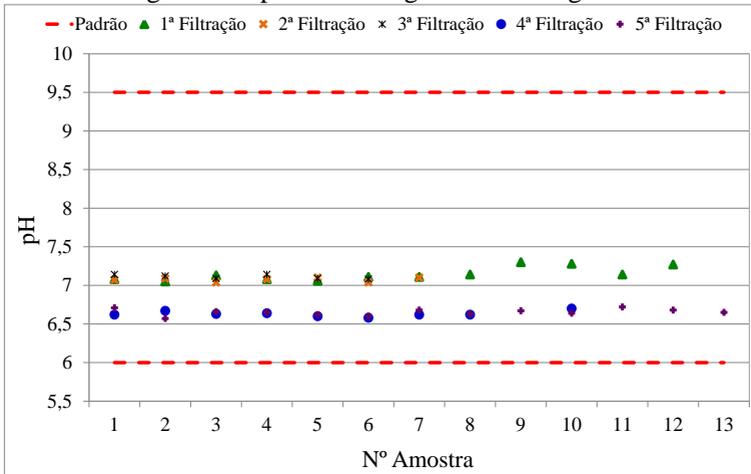
Fonte: Dados primários (2012)

Figura 63 – pH: chamote de granulometria grossa



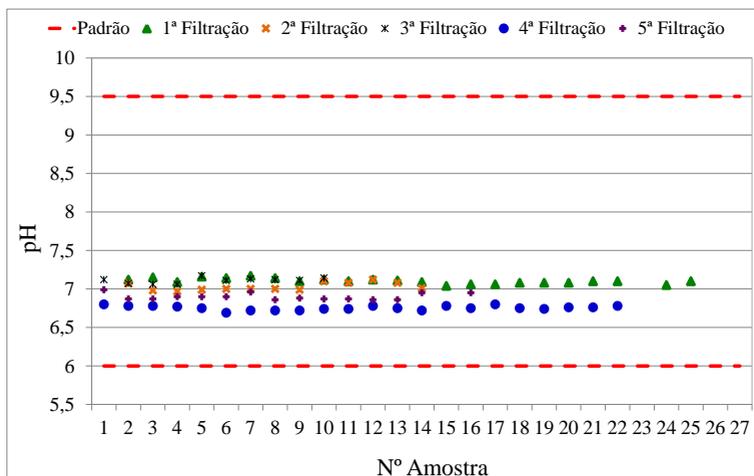
Fonte: Dados primários (2012)

Figura 64 – pH: areia de granulometria grossa



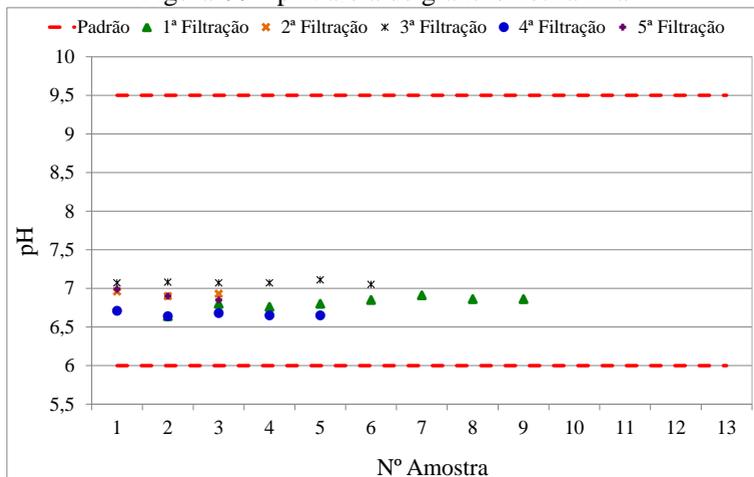
Fonte: Dados primários (2012)

Figura 65 – pH: chamote de granulometria fina



Fonte: Dados primários (2012)

Figura 66 – pH: areia de granulometria fina



Fonte: Dados primários (2012)

Procedendo a análise dos dados de pH coletados durante as filtrações, verifica-se que os leitos de chamote britado e de areia obtiveram resultados bastante semelhantes, concentrando grande parte dos pontos na faixa entre 6,5 e 7,5, próximo ao limite inferior do padrão estabelecido pela portaria MS nº 2914 de 12/12/11. Além de evidenciar

o bom andamento da coagulação durante o pré-tratamento da água bruta, o comportamento apresentado torna-se interessante para a etapa de desinfecção, que poderia ser realizada seguramente sem alterar o pH da água para além dos padrões de potabilidade.

O tipo de elemento filtrante, bem como a sua distribuição granulométrica, não influenciaram significativamente o pH da água filtrada. Isso era esperado, já que o pH é função da etapa de coagulação, tendo pouca relação com a etapa de filtração. O comportamento semelhante que ambos os materiais filtrantes apresentaram para o pH apenas confirma que a água neles filtrada foi pré-tratada exatamente pela mesma metodologia de coagulação. Embora haja oscilações, estas são muito pequenas e sem correlação direta com as demais variáveis de filtração.

7.2.3.3 Vazão

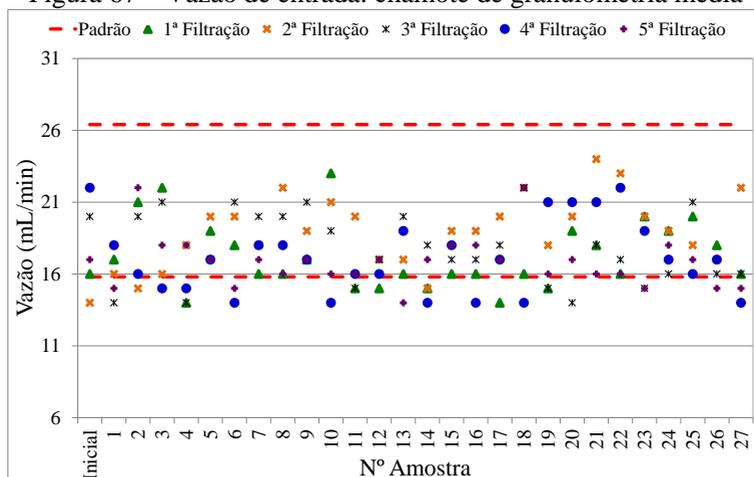
Conforme fora comentado por Di Bernardo (2003), o controle da vazão está ligado diretamente à taxa de filtração. A taxa de filtração é um bom indicativo a respeito da eficiência de filtração, mensurando a vazão de água que está sendo tratada por unidade de área do filtro. Em termos matemáticos, a referida taxa é obtida pela relação entre a vazão de água e a área da secção transversal do filtro. Como esperado, à medida que o leito filtrante vai sendo saturado pelas impurezas presentes na água, a sua porosidade diminuiu, até um ponto onde a taxa de filtração, bem como a vazão de saída de água filtrada, caem consideravelmente. Neste ponto, fica caracterizada a colmatação do leito de filtração.

Portanto, o controle da vazão tem duas premissas: garantir um padrão de alimentação de água ao filtro e antever o ponto de saturação do leito filtrante. No quesito alimentação de água, o controle é dado principalmente na vazão de entrada do filtro, de modo evitar oscilações bruscas de entrada de líquido ao sistema e garantir que a pressão de coluna de fluido seja a mais constante possível. A previsão do ponto de saturação do meio filtrante, por sua vez, é realizada com base na vazão de saída, fornecendo indícios de que o sistema está sobrecarregado e precisando ser parado para limpeza. Sob este prisma e tendo por base os estudos de Di Bernardo (2003), apurou-se que os filtros estudados precisariam trabalhar com vazões entre 15,8 e 26,4 mL/min para atingir a taxa de filtração recomendada pelo autor em questão.

O controle das vazões foi realizado por meio de gráficos confeccionados no software MS Excel 2010. Para facilitar a análise, optou-se por separar as vazões de entrada e saída, já que cada uma delas leva a conclusões distintas. A metodologia de confecção dos gráficos foi exatamente a mesma que fora empregada para a avaliação do pH. No total foram confeccionados seis gráficos para a vazão de entrada e outros seis para a vazão de saída. Cada gráfico representa uma formulação granulométrica (média, grossa ou fina) de um elemento filtrante (areia ou chamote britado), englobando o comportamento da vazão ao longo do tempo de todas as filtrações realizadas frente ao padrão sugerido de 15,8 a 26,4 mL/min (representado por linhas tracejadas).

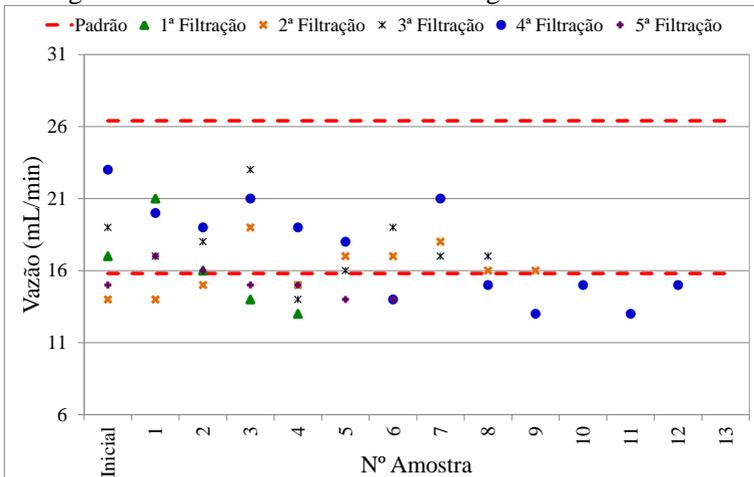
A seguir, expõem-se os gráficos de controle de vazão de entrada, que têm por intuito controlar a uniformidade de alimentação de água ao sistema de filtragem. É interessante ressaltar que, como cada filtro possui mecanismo independente de controle de vazão, os valores da referida variável para os filtros de areia e de chamote britado não serão iguais.

Figura 67 – Vazão de entrada: chamote de granulometria média



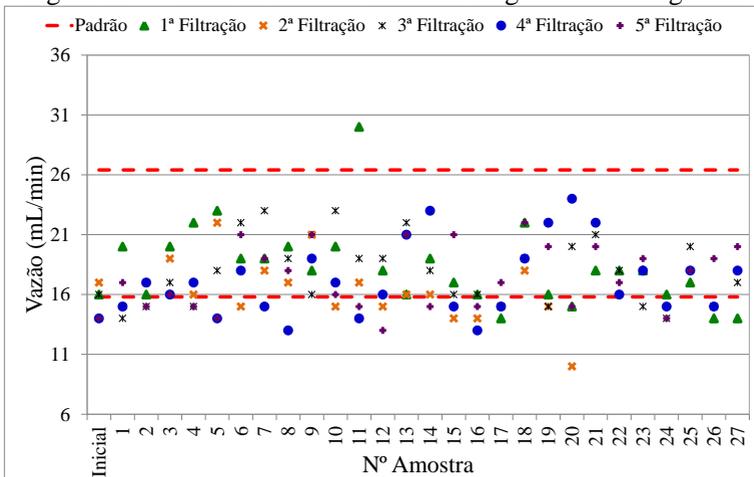
Fonte: Dados primários (2012)

Figura 68 – Vazão de entrada: areia de granulometria média



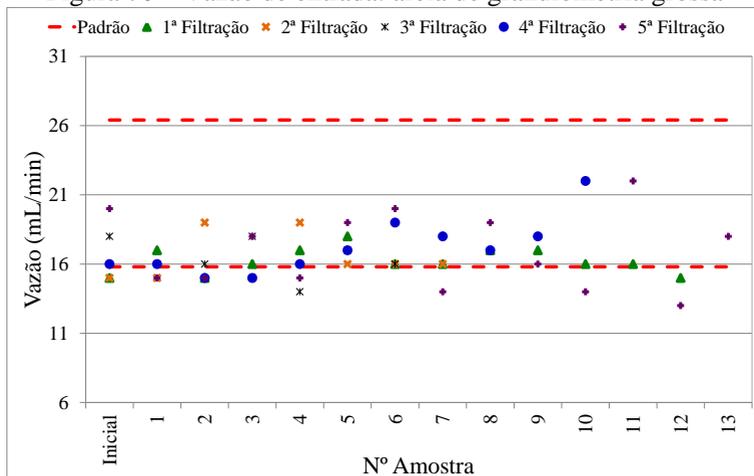
Fonte: Dados primários (2012)

Figura 69 – Vazão de entrada: chamote de granulometria grossa



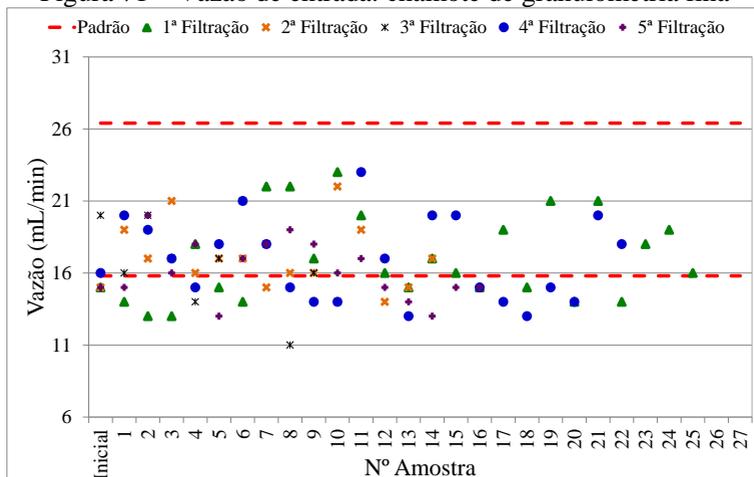
Fonte: Dados primários (2012)

Figura 70 – Vazão de entrada: areia de granulometria grossa



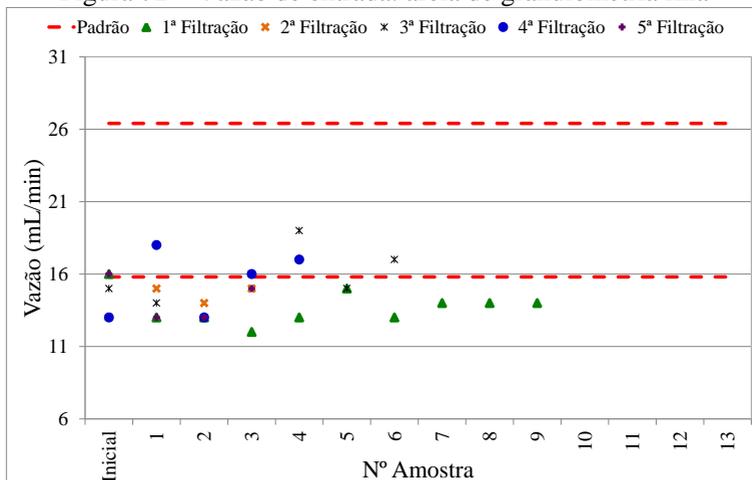
Fonte: Dados primários (2012)

Figura 71 – Vazão de entrada: chamote de granulometria fina



Fonte: Dados primários (2012)

Figura 72 – Vazão de entrada: areia de granulometria fina



Fonte: Dados primários (2012)

Antes de se proceder a análise dos dados, é preciso reforçar que os dados de vazão de entrada expressos nos gráficos são aqueles coletados no momento da tomada das amostras de água filtrada. Se um baixo valor de vazão de entrada fosse detectado durante a amostragem, o valor era registrado e a vazão era corrigida na válvula de controle. A vazão corrigida não foi registrada.

Passando a discussão dos resultados obtidos, nota-se que independentemente do tipo de material filtrante ou da formulação granulométrica utilizada, os gráficos demonstram uma séria dificuldade para o controle de vazão de entrada, ratificada pelo bom número de dados fora do padrão estabelecido. De fato, o sistema de controle de vazão de entrada não se mostrou adequado na prática. A válvula de controle empregada é originalmente projetada para uso em redes de ar comprimido, não sendo recomendável seu uso em água. Entupimentos eram registrados com frequência, demandando um acompanhamento constante. Válvulas específicas para águas ricas em impurezas foram encontradas, mas o seu uso foi prontamente descartado devido ao alto custo envolvido.

Com exceção das filtrações conduzidas em leitos de formulação granulométrica mais fina, todas as demais apresentaram a maior parte dos dados de vazão de entrada dentro os limites do padrão. Percebe-se que, com exceção da formulação granulométrica fina, tanto os leitos de

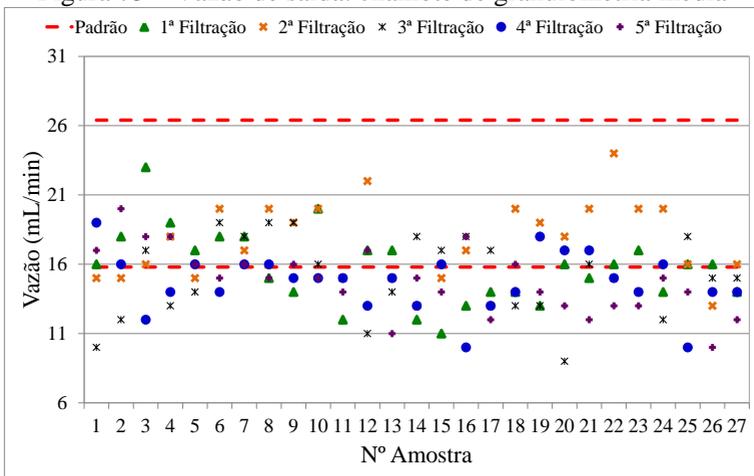
chamote britado quanto os leitos de areia apresentaram raras vezes menos de 60% dos valores coletados de vazão de entrada abaixo do padrão. Dentre as filtrações que não conseguiram atingir tal percentual, a maioria esmagadora destas foi conduzida em leitos de areia, onde, em todos os casos, o tempo de trabalho foi muito pequeno, de modo que qualquer valor abaixo dos limites estabelecidos reflita em um grande valor percentual.

O diminuto tempo de operação também justifica a pequena quantidade de dados encontrados dentro dos padrões nos filtros que operaram com as formulações granulométricas finas. A isto, soma-se a maior instabilidade que as filtrações em leitos ricos em grãos pequenos apresentam. Devido aos espaços menores entre os grãos de material filtrante, os leitos das formulações granulométricas mais finas tendem a serem mais sensíveis ao entupimento, exigindo cuidado redobrado. O maior cuidado impeliu a necessidade de se realizar mais medições de vazão – embora apenas as medições realizadas no momento da coleta das amostras fossem computadas – e, o maior número de medições contribuiu para o surgimento de mais dados fora do padrão.

Finalizando, é preciso mencionar os baixos índices de coeficiente de variação das medidas, conforme se observa no apêndice B deste trabalho. Este importante indicador consiste de uma ferramenta estatística capaz de avaliar a estabilidade de um conjunto de dados. Matematicamente, é resultado do quociente entre o desvio padrão amostral pela média, e deve ser expresso em valores percentuais. Para que a amostragem submetida ao coeficiente de variação seja considerada como “estável”, o referido índice deve apresentar resultados inferiores a 20%. À luz do coeficiente de variação, confirma-se a ausência de grandes oscilações na vazão de entrada, já que todas as filtrações realizadas (com exceção da 1ª filtração conduzida em leito de areia de formulação granulométrica média) apresentaram coeficientes de variação inferiores a 20%. Mesmo que a maior parte dos pontos tenha se situado próximo ou levemente aquém do limite inferior do padrão, ratifica-se, pois, que a vazão de entrada teve comportamento estável do ponto de vista estatístico. Evidencia-se, portanto, que o desempenho da válvula de controle não foi suficientemente negativo para comprometer o estudo; apenas demandou um acompanhamento mais rígido do sistema de filtração.

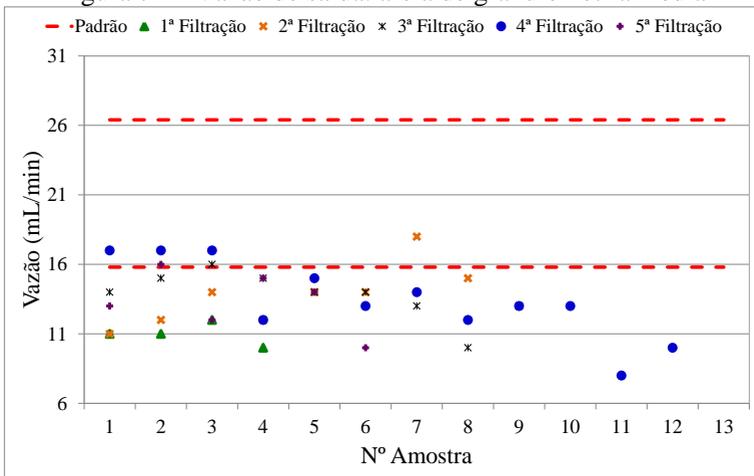
No que tange à vazão de saída, variável utilizada para avaliação da saturação do filtro, obteve-se os seguintes resultados:

Figura 73 – Vazão de saída: chamote de granulometria média



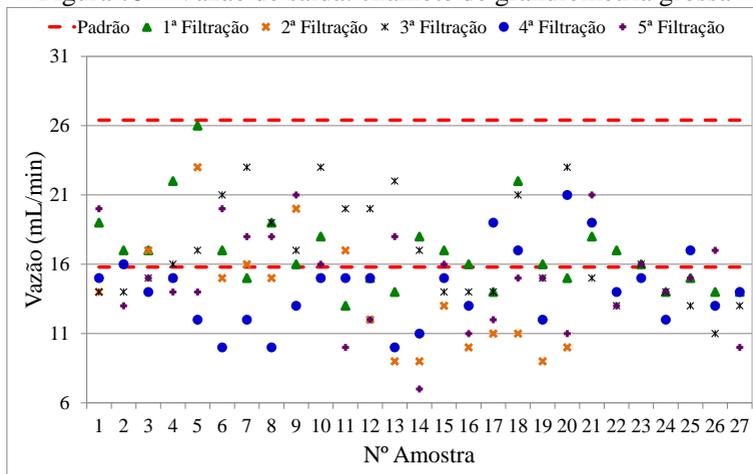
Fonte: Dados primários (2012)

Figura 74 – Vazão de saída: areia de granulometria média



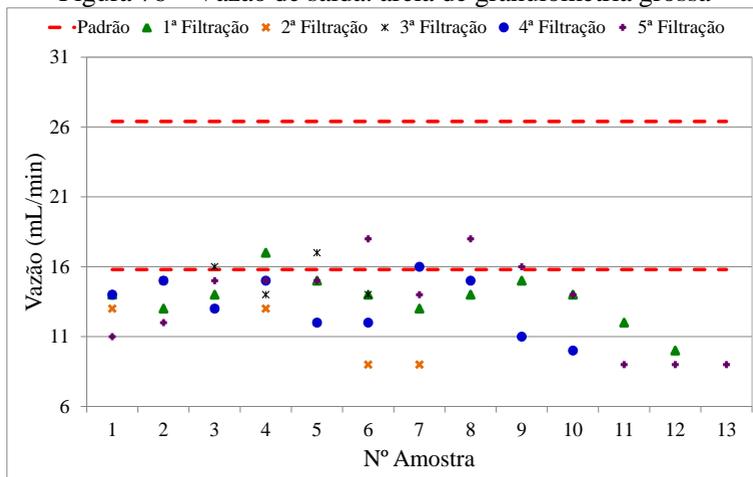
Fonte: Dados primários (2012)

Figura 75 – Vazão de saída: chamote de granulometria grossa



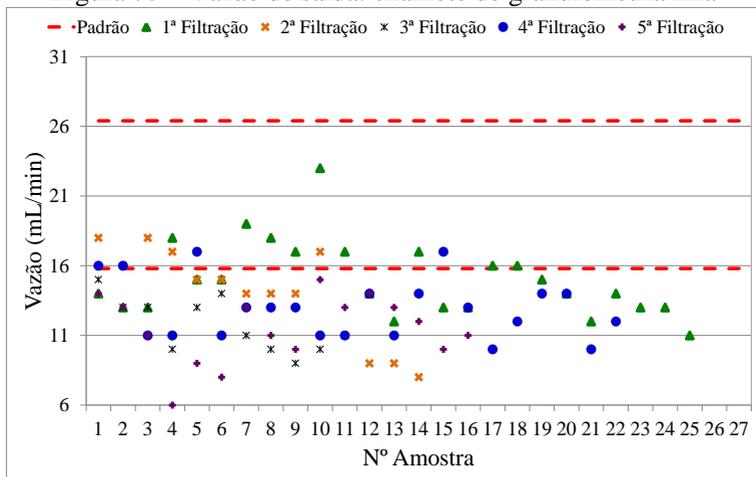
Fonte: Dados primários (2012)

Figura 76 – Vazão de saída: areia de granulometria grossa



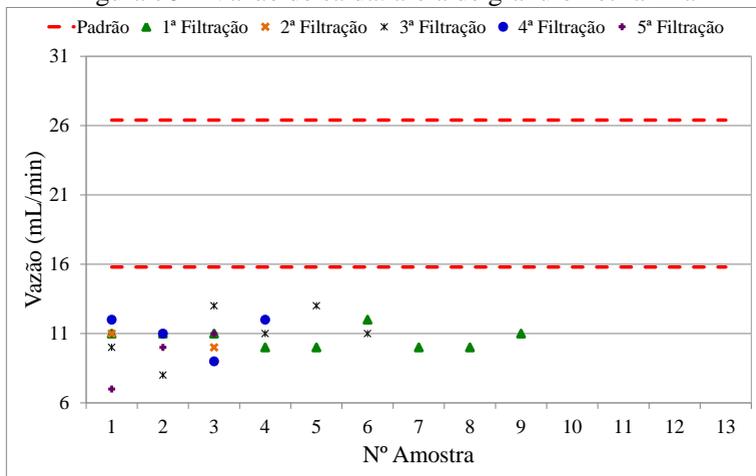
Fonte: Dados primários (2012)

Figura 77 – Vazão de saída: chamote de granulometria fina



Fonte: Dados primários (2012)

Figura 78 – Vazão de saída: areia de granulometria fina



Fonte: Dados primários (2012)

Visualmente é possível perceber que a vazão de saída apresentou muito mais valores fora do padrão do que o apresentado pela vazão de entrada. Ao contrário da vazão de entrada, que pode ser controlada com ajuda de uma válvula mecânica, a vazão de saída depende totalmente da

pressão exercida pela coluna de fluido sobre o leito de filtração, bem como da porosidade deste último. O controle da vazão da saída não pode ser realizado diretamente, mas é sim fruto das condições gerais do sistema de filtração. Portanto, resta-se apenas acompanhá-lo.

Semelhantemente ao que ocorrera com a vazão de entrada, a quantidade de valores fora de padrão na vazão de saída foi maior nas granulometrias mais finas. É possível perceber que em todas as filtrações realizadas em leito de areia de granulometria mais fina, tal qual duas das cinco filtrações conduzidas em leito de chamote britado de mesma distribuição granulométrica, não houve um único valor sequer de vazão de saída dentro do padrão. Este fato vem corroborar a maior perda de carga que as granulometrias finas impõem ao sistema de filtração e refletiu não só na vazão de saída, como também no tempo de operação dos filtros de ambos os materiais filtrantes que foram recheados com a formulação granulométrica mais fina. De fato, as formulações ricas em grãos mais finos foram aquelas que colmataram mais rapidamente.

Nas demais formulações granulométricas, os leitos de chamote britado tiveram desempenho superior aos leitos de areia na manutenção da vazão de saída dentro dos padrões estipulados por Di Bernardo (2003). As dimensões irregulares do chamote britado permitem a formação de poros maiores entre os grãos do leito filtrante sem que se perca a eficiência de filtração. As áreas dos poros nos leitos de chamote britado tendem a serem maiores se comparadas às áreas dos poros dos leitos de areia. O caráter irregular dos grãos do chamote britado altera o regime laminar de escoamento da água nos interstícios do leito e impõe barreiras à passagem dos flocos de sujeira mesmo em orifícios maiores, resultando em maior vazão de água e maior retenção de impurezas. A areia, por ser essencialmente regular, não é tão eficiente neste quesito.

Ressalta-se também que, salvo raras exceções, não se verificaram grandes picos de vazão de saída em nenhum dos dois materiais filtrantes testados. Isto vem a reafirmar que as oscilações de vazão de entrada causadas pela ineficiência da válvula de controle não foram suficientemente graves para comprometer as conclusões desta pesquisa.

7.2.3.4 Tempo de operação

As horas trabalhadas constituem uma importante variável, pois é o indicador da longevidade operacional do leito filtrante. Por mais eficientes que sejam na remoção de turbidez, os meios filtrantes não

serão financeiramente interessantes se precisarem ser constantemente parados para limpeza – isto inviabiliza a operação técnico-econômica do filtro. O ideal é que o leito filtrante opere o máximo de tempo possível sem perder a eficiência e parando o mínimo possível para manutenção e limpeza.

É mister lembrar que o tempo de operação do filtro é função das demais características do processo, como granulometria do leito, vazão de entrada e saída do fluido, concentração de sólidos na água a filtrar e taxa de filtração, e, portanto, não pode ser diretamente controlado.

Para este estudo, o controle do tempo de operação do filtro foi realizado por meio de uma tabela, na qual se expõem os resultados detalhados de cada uma das filtrações realizadas, estratificadas por tipo de elemento filtrante e por formulação granulométrica, conforme segue:

Tabela 18 – Tempo de operação das filtrações

Formulação granulométrica	Nº da filtração	Tempo de operação (h)	
		Chamote	Areia
Média	1 ^a	9,0	1,3
	2 ^a	9,0	3,0
	3 ^a	9,0	2,7
	4 ^a	9,0	4,0
	5 ^a	9,0	2,0
Grossa	1 ^a	9,0	4,0
	2 ^a	6,7	2,3
	3 ^a	9,0	2,0
	4 ^a	9,0	3,3
	5 ^a	9,0	4,3
Fina	1 ^a	8,3	3,0
	2 ^a	4,7	1,0
	3 ^a	3,3	2,0
	4 ^a	7,3	1,7
	5 ^a	5,3	1,0

Fonte: Dados primários (2012)

Para todos os casos e condições avaliadas, os leitos de chamote britado foram capazes de operar por mais tempo do que seus concorrentes de areia. Com exceção dos resultados obtidos nas filtrações conduzidas em leito de formulação granulométrica fina e de uma única filtração realizada em leito de formulação granulométrica grossa, as filtrações que empregaram o leito de chamote britado sempre precisaram ser paradas compulsoriamente para limpeza após atingir 9 horas ininterruptas de trabalho – e em todas essas oportunidades, não foram percebidos sinais de saturação do leito ao final da operação. Mesmo quando colmatou antes de atingir o tempo limite de 9 horas de trabalho, caso verificado em todas as filtrações realizadas em formulações granulométricas finas e em uma filtração conduzida em leito da formulação granulométrica grossa, os leitos de chamote britado operaram por mais tempo que os correspondentes leitos de areia. Em todas as oportunidades, os leitos de areia foram parados por colmatação. O maior tempo de trabalho ininterrupto destes foi de 4,3 horas, observado em uma singular filtração conduzida em leito de formulação granulométrica grossa. Esse tempo, se comparado aos tempos obtidos pelos leitos de chamote britado, supera apenas uma única filtração realizada em leito de chamote britado de formulação fina, a qual operou por 3,3 horas. Em todos os demais casos, o maior tempo de operação obtido por um leito de areia ficou aquém dos tempos de trabalho conseguidos pelos leitos de chamote britado.

Novamente, o maior responsável pelo desempenho superior dos leitos de chamote britado foram a sua maior porosidade, bem como as dimensões irregulares dos seus grãos. Essas características dão aos leitos de chamote britado a capacidade de permitir maiores vazões ao líquido que os percola, sem que haja perda de eficiência na remoção de turbidez.

Avaliando o tempo de operação do ponto de vista das distribuições granulométricas, apura-se que para os leitos de chamote britado, os melhores resultados foram atingidos nas seguintes formulações granulométricas, respectivamente: média, grossa e fina. No caso dos leitos de areia, a granulometria mais grossa foi a que operou mais tempo, seguida pela granulometria média e pela granulometria rica em grãos finos. É consenso para ambos os materiais filtrantes que a distribuição granulométrica mais fina é a que gera os piores resultados de tempo de operação e isso é compreensível, haja vista que a referida formulação tende a reter mais impurezas. Se comparados a formulações granulométricas mais ricas em médios e grossos, os leitos de

formulações granulométricas mais finas apresentam poros de menor tamanho, que justificam a sua facilidade de colmatação.

Embora estudos mais prolongados precisem ser realizados para que conclusões definitivas possam ser tiradas quanto à variável “tempo de operação”, percebe-se à primeira vista que o desempenho superior obtido pelos leitos de chamote britado frente aos leitos de areia em todas as situações estudadas é muito interessante. Se os leitos de chamote britado conseguirem reproduzir em escala industrial a mesma performance observada em laboratório quanto a tempo de operação, poder-se-á reduzir consideravelmente os gastos de manutenção dos filtros, notadamente nas paradas para limpeza. Além de operar por mais tempo, os leitos de chamote, por terem menor massa específica, podem fluidificar com maior facilidade durante a operação de limpeza. – e tudo isto se traduz em menores números de paradas para limpeza, menores consumos de água nas retrolavagens e, conseqüentemente, menores custos operacionais.

7.2.3.5 Avaliação global das variáveis envolvidas

Os dados tratados estatisticamente foram reunidos nas tabelas constantes ao apêndice B, permitindo uma avaliação global de todo o processo de filtração. Antes de dar prosseguimento à análise, é preciso lembrar que os dados da 2ª e 5ª filtrações conduzidas no leito de areia de formulação granulométrica fina, embora presentes na tabela, não foram considerados em virtude da pequena amostragem de dados por elas proporcionada.

Avaliando os resultados obtidos, aprecia-se que os leitos compostos por grãos de chamote britado obtiveram resultados melhores do que os leitos de areia em três variáveis: remoção de turbidez, vazão de saída e tempo de operação. Em todos estes casos, o melhor desempenho se deu em virtude da forma irregular dos grãos de chamote britado, característica que permite ao leito de filtração apresentar poros maiores que facilitem a passagem da água e prolonguem o tempo de operação, sem que haja perda na eficiência de remoção de turbidez. De fato, ao verificar o percentual de remoção de turbidez, é nítida a maior eficiência dos leitos de chamote britado frente aos seus correspondentes de areia, independentemente da formulação granulométrica testada. O mesmo efeito é verificado para as outras duas variáveis. Em todas as distribuições granulométricas testadas, os filtros recheados com chamote

britado mostraram maior facilidade na manutenção da vazão de saída, bem como maior longevidade, se comparados aos leitos de areia – o que se traduz em maior produtividade com menor manutenção.

No caso das variáveis “pH da água filtrada” e “vazão de entrada”, identificam-se que os leitos de chamote britado e de areia alcançaram desempenhos muito próximos uns dos outros. Isto, entretantes, pouco interfere na avaliação dos materiais filtrantes, já que são pouco ou nada influenciados pelos leitos de filtração. Enquanto o pH é determinado no pré-tratamento da água bruta, a vazão de entrada é função da válvula que controla a admissão de água aos filtros de laboratório – o que justifica o desempenho semelhante que ambas as variáveis apresentaram nos leitos de chamote britado e de areia.

Apura-se desta maneira que o chamote britado reúne condições para uso como elemento filtrante, tendo desempenho igual, e em alguns aspectos superior ao da areia convencionalmente empregada nos filtros industriais. Resta apenas apreciar se o mesmo não comprometerá a qualidade final da água, algo que se fará na seção a seguir.

7.2.4 Qualidade final da água filtrada

A última fase desta pesquisa consiste na análise química dos componentes presentes às águas filtradas nos leitos de chamote britado e de areia. O intuito é comprovar se algum elemento químico componente dos leitos filtrantes testados foi dissolvido e carregado pela água por eles filtrada. As amostras, tomadas durante as filtrações, foram envazadas em garrafas de politereftalato de etileno (PET), de acordo com a figura:

Figura 79 – Aspecto visual da água bruta e da água filtrada



Fonte: Dados primários (2012)

Através da imagem é possível apurar a eficiência da filtração por comparação visual. A garrafa do meio, contendo água bruta, apresenta coloração amarelada e depósito de sujeira ao fundo do frasco, enquanto as amostras das demais garrafas, pré-tratadas e filtradas em leitos chamote britado e de areia, estão visualmente límpidas e sem deposição de sujeira.

Com exceção da água bruta, as amostras exibidas na imagem anterior foram encaminhadas a laboratórios especializados para quantificação de elementos inorgânicos, conforme fora definido no capítulo 6 deste trabalho. Dois laboratórios foram envolvidos, sendo um localizado no Estado de Santa Catarina e outro no Estado de São Paulo. A proposta inicial era realizar todos os ensaios no laboratório localizado em Santa Catarina, porém, apurou-se que as técnicas analíticas empregadas por este não apresentavam a precisão exigida pela legislação brasileira para a detecção de alguns parâmetros. Por isso, o laboratório de São Paulo também foi envolvido. Os resultados obtidos por ambos foram comparados aos limites de potabilidade expressos na legislação brasileira.

O laboratório situado no Estado de Santa Catarina mensurou as concentrações dos elementos arsênio, ferro, manganês e zinco, empregando a espectrofotometria de absorção atômica como técnica de quantificação. As concentrações dos demais inorgânicos (cobre, cromo, fluoretos e níquel) foram mensuradas pelo laboratório localizado em São Paulo. Para tal, o laboratório paulista se valeu do emprego de duas técnicas analíticas: a cromatografia de íons para análise de fluoretos; e a espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) para a análise dos demais parâmetros. Por fim, os parâmetros cádmio e chumbo foram quantificados por ambos os laboratórios, mas apenas os resultados obtidos pelo laboratório de São Paulo foram avaliados, já que sua metodologia de análise apresentava maior precisão do que a técnica utilizada pelo laboratório catarinense. A metodologia de análise de cádmio e chumbo empregada pelo laboratório catarinense foi a espectrofotometria de absorção atômica, enquanto o laboratório paulista optou pela espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES).

A tabela na sequência sintetiza os resultados de análise química obtidos nas águas filtradas em leitos de areia e de chamote britado. Nela também constam os limites de detecção da técnica analítica empregada na mensuração de cada um dos elementos rastreados, bem como os

limites de potabilidade definidos em lei pelo Ministério da Saúde do Brasil através das portarias MS nº518 de 25/03/04 e MS nº2914 de 12/12/2011. Deste modo, tem-se:

Tabela 19 – Análise de inorgânicos presentes à água filtrada ($\mu\text{g/L}$)

Parâmetro	Mínimo Detectável	Filtração Chamote	Filtração Areia	Tolerável Legislação
Arsênio	1,0	< 1,0	< 1,0	10,0
Cádmio	0,1	< 0,1	< 0,1	5,0
Chumbo	1,0	< 1,0	< 1,0	10,0
Cobre	20,0	< 20,0	< 20,0	2000,0
Cromo	40,0	< 40,0	< 40,0	50,0
Fluoretos	20,0	190,0	190,0	1500,0
Ferro Total	20,0	50,0	40,0	300,0
Níquel	10,0	< 10,0	< 10,0	70,0
Manganês	10,0	< 10,0	< 10,0	100,0
Zinco Total	10,0	< 10,0	< 10,0	5000,0

Fonte: UNESCO (2012); IPEN/CNEN (2013)

Percebe-se, pois, que nenhum dos materiais filtrantes liberou na água filtrada qualquer um dos elementos avaliados em quantidade superior ao permitido pela legislação. Bem da verdade, todos os parâmetros avaliados apresentaram concentrações inferiores ao limite de detecção da técnica analítica, exceção feita aos fluoretos e ao ferro total. Mesmo apresentando concentrações superiores ao mínimo detectável pela metodologia de análise química, tanto os fluoretos quanto o ferro total apresentaram valores muito aquém do permitido pelas portarias do Ministério da Saúde do Brasil.

Verifica-se também que em todos os elementos químicos rastreados, as amostras de água filtradas em leito de chamote britado e em leito de areia apresentaram resultados semelhantes. Mesmo nos parâmetros que apresentaram concentrações superiores ao mínimo detectável pela técnica analítica, caso dos fluoretos e do ferro total, as amostras de água filtradas em leito de chamote britado expuseram concentrações muito próximas ou iguais àquelas percebidas nas amostras filtradas em leito de areia. Este fato evidencia que os leitos de

areia e de chamote britado não emitiram nenhum dos elementos químicos estudados ao seio da água ou, se o fizeram, fizeram de modo semelhante, inclusive nas quantidades. Dada as distintas características físico-químicas apresentadas pela areia e pelo chamote britado, é mais provável que a primeira conclusão seja a mais acertada – isto é, não houve emissão em quantidades significativas de quaisquer elementos pelos leitos de filtragem. É provável que as concentrações de fluoretos e ferro total apresentadas nos ensaios laboratoriais sejam características da água bruta ou do pré-tratamento efetuado à água bruta, tendo pouca ou nenhuma relação com o tipo de material que compõe o leito de filtração.

A princípio e à luz dos parâmetros estudados, ambos os materiais filtrantes estariam liberados para emprego em filtros de tratamento de água em larga escala. É fato que a legislação brasileira exige a realização de ensaios para muitos outros elementos químicos inorgânicos que não foram abordados por este trabalho de pesquisa, como antimônio, cianeto, mercúrio, selênio, dentre outros. A escolha dos elementos a serem avaliados se deu com base na sua periculosidade à saúde humana e no seu eventual emprego na fabricação cerâmica, já que muitos destes são componentes de corantes utilizados na fabricação de porcelanato. Mesmo assim, não se podem negligenciar os demais elementos químicos que não foram quantificados neste trabalho. A conclusão definitiva a respeito da empregabilidade do chamote britado como elemento filtrante somente poderá ser tirada uma vez que todos os parâmetros químicos mencionados pelas portarias MS nº518 de 25/03/04 e MS nº2914 de 12/12/2011 forem rastreados na água por este filtrada. Neste sentido, é interessante que tais monitoramentos sejam realizados em escala-piloto, permitindo uma avaliação de todos os parâmetros recomendados por lei por tempos de operação maiores do que os empregados nas filtrações de laboratório.

Ainda que a análise química praticada neste trabalho de pesquisa esteja aquém do recomendado por lei e tenha sido realizada apenas em filtrações de laboratório, pode-se afirmar que o chamote britado apresenta condições de ser empregado como meio filtrante à priori, já que os elementos químicos não avaliados são incomuns ao processo de fabricação de porcelanato. Este fato, ainda assim, não exime a realização de estudos mais aprofundados quanto à análise química da água filtrada em leitos de chamote britado em escala-piloto. Apenas assim poder-se-á garantir totalmente que não haverá contaminações do meio aquoso que venham a por em risco a saúde humana.

8 CONCLUSÃO

A correta destinação dos subprodutos industriais constitui uma questão que instiga cientistas e empreendedores desde os tempos da Revolução Industrial. Depositá-los no meio ambiente indubitavelmente significa contaminar hoje os recursos de que se precisará amanhã. Por este motivo, práticas sustentáveis vêm ganhando força dia após dia.

A abrangência deste novo contexto mundial também alcança a indústria de revestimentos cerâmicos. Um dos mais críticos problemas deste ramo de atividade está na deposição final da quebra queimada dos porcelanatos – ou simplesmente chamote – material que apresenta poucas alternativas viáveis de reaproveitamento. Este estudo, pois, se desenvolveu com o intento de propor uma alternativa para transformar em um “novo produto” aquilo que é considerado como um “rejeito”.

Ao término desta pesquisa, apurou-se que as quebras queimadas de porcelanato, uma vez britadas e classificadas granulometricamente, apresentam potencial para emprego como elemento filtrante no tratamento de água. As filtrações realizadas em laboratório explicitaram que os leitos de chamote britado apresentaram desempenho igual ou superior em todas as variáveis estudadas aos seus equivalentes de areia lavada, que é o meio filtrante mais amplamente utilizado em escala mundial para o tratamento de água. Além de mais eficientes na remoção de turbidez, os leitos de chamote britado também foram capazes de operar com taxas de filtração maiores, o que se traduz em maior produtividade do sistema de tratamento. Seu menor peso específico, se comparado ao da areia, permite que sua operação de fluidificação para limpeza do leito filtrante empregue menor quantidade de água a pressões menores, o que diminui os custos de manutenção.

Com vistas a garantir que nenhum componente dos meios filtrantes fosse carreado pela corrente líquida, de modo a assegurar a potabilidade estabelecida em lei, vários compostos inorgânicos tiveram suas presenças rastreadas na água filtrada tanto pelas quebras queimadas de porcelanato quanto pela areia. Percebeu-se, pois, que os leitos de ambos os materiais testados apresentaram resultados muito semelhantes, evidenciando que não houve emissão significativa de quaisquer compostos inorgânicos.

Outro ganho que os leitos de chamote britado proporcionam frente aos leitos de areia diz respeito a sua obtenção. O chamote de porcelanato é um subproduto da indústria cerâmica. Para utilizá-lo ao

fim proposto, basta britá-lo e classificá-lo granulometricamente. A areia, por sua vez, é retirada da natureza, em leito de rios – atividade que se não for adequadamente realizada pode trazer consequências ambientais muito mais graves do que a simples deposição do chamote na natureza.

Apesar de todas as vantagens apresentadas, é preciso aprofundar ainda mais os estudos a respeito da empregabilidade do chamote de porcelanato como meio filtrante antes de recomendar a sua utilização em escala comercial, pois: (a) os experimentos foram realizados unicamente em laboratório em filtros de PVC de perfil redondo – algo incomum às filtrações praticadas nas ETA's; (b) todos os resultados foram coletados em apenas 15 filtrações de laboratório – o que é muito pouco; (c) o número de compostos inorgânicos rastreados na água filtrada foi muito menor do que é recomendado pela legislação; e (d) o desgaste dos leitos de filtração por tempo de uso não foi avaliado.

Para que todos estes pontos sejam levados em consideração de forma a dissipar todas as dúvidas quanto à viabilidade do emprego como elemento filtrante das quebras queimadas de porcelanato, sugere-se que: (a) testes prolongados com várias distribuições granulométricas sejam realizados em escala-piloto, onde as variáveis de um sistema real de filtração poderão ser simuladas com maior precisão; (b) estudos para rastreamento de compostos inorgânicos no seio da água filtrada sejam ampliados, de modo a abranger, no mínimo, todos os parâmetros de potabilidade constantes nas portarias do Ministério da Saúde do Brasil; e (c) o desgaste e a durabilidade do leito filtrante sejam avaliados em longo prazo.

Somente após a realização de todas estas sugestões, poder-se-á recomendar com segurança o emprego de leitos filtrantes de chamote britado de porcelanato como substituintes à altura dos leitos de areia.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTO. **História da cerâmica**. Disponível em: < <http://www.anfacer.com.br>>. Acesso em: 18 nov 2012.

BERNARDIN, Adriano Michael et al. Reaproveitamento de resíduos de polimento e de esmaltação para obtenção de cerâmica celular. **Cerâmica Industrial**, v. 11 n. 5, p.31-34, 2006.

BRASIL, Portaria MS n.2914, de 12 de dezembro de 2011. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 14 dez. 2011. Seção 1, p. 39.

BRASIL, Portaria MS n.518, de 25 de março de 2004. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 26 mar. 2004. Seção 1, p. 226.

BRISTOT, Vilmar Menegon. **Máquinas e equipamentos para cerâmica**. Criciúma: Editora Luana, 1996, 352 p.

BRITO, Ludmila Ladeira Alves de et al. Amadurecimento de filtros lentos de areia e remoção de microrganismos indicadores de qualidade da água ao longo da profundidade do leito: uma avaliação em instalação piloto. **Eng. Sanit. Ambient.**, v.10, n.4, pp. 307-317, 2005.

CAMPELO, Nilton de Souza et al. Estudo da utilização de resíduo cerâmico queimado (“chamote”) oriundo do pólo oleiro dos municípios de Iranduba e Manacapuru - AM, como aditivo na fabricação de telhas. **Cerâmica Industrial**, v. 11 n. 1, p.44-46, 2006.

CASAGRANDE, Marcos Cardoso et al. Reaproveitamento de resíduos sólidos industriais: processamento e aplicações no setor cerâmico. **Cerâmica Industrial**, v. 13 n.1, p.34-42, 2008.

CAVALCANTE, Wagner Fabiano Viana; FERREIRA, Ricardo Artur Sanguinetti; YADAVA, Yogendra Prasad. Estudo do potencial de produção de massas para revestimento cerâmico utilizando resíduos do

processo de fabricação de louças sanitárias. **Cerâmica Industrial**, v. 13 n. 5, p.29-33, 2008.

DI BERNARDO, Luiz. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. Rio de Janeiro: ABES, 1993.

DI BERNARDO, Luiz. **Tratamento de água para abastecimento por filtração direta**. São Carlos, SP: RiMA, 2003. 480 p.

DI BERNARDO, Luiz; DI BERNARDO, Angela; CENTURIONE FILHO, Paulo Luiz. **Ensaio de tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos, SP: RiMA, 2002, 237 p.

FOUST, Alan S. **Princípios das operações unitárias**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1982, 670 p.

HECK, Clarice. Grés porcelanato. **Cerâmica Industrial**, v. 1 n. 4, p.21-24, 1996.

HUISMAN, L; WOOD, W.E. **Slow Sand Filtration**. Genebra: WHO, 1974, 44p.

LEME, Francilio Paes. **Teoria e técnicas de tratamento de água**. São Paulo: CETESB, 1979, 424 p.

LIBÂNIO, Marcelo. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 2. ed. Campinas: Átomo, 2008, 444 p.

LOURENÇO FILHO, Ruy de Carvalho Bergstrom. **Controle estatístico de qualidade**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1976, 223p

MANCUSO, Pedro Caetano Sanches; SANTOS, Hilton Felício. **Reuso de água**. Barueri: Manole, 2003. 579p.

MARTÍN, Fernando Lucas. Processos produtivos em revestimentos cerâmicos: variáveis de processo e possíveis causas de defeitos. **Cerâmica Industrial**, v. 9 n. 5, p.7-20, 2004.

MENEGAZZO, Ana Paula Margarido et al. Grés porcelanato. Parte I: Uma abordagem mercadológica. **Cerâmica Industrial**, v. 5 n.5, p.7-10, 2000.

MODESTO, Cláudio de Oliveira et al. Obtenção e caracterização de materiais cerâmicos a partir de resíduos sólidos industriais. **Cerâmica Industrial**, v. 8 n. 4, p.14-18, 2003.

MODESTO, Cláudio de Oliveira; BARBOSA JÚNIOR, José Celso. **Materiais Cerâmicos**. Cocal do Sul: CMG, 2001, 305p

MODESTO, Cláudio de Oliveira; MENEGALLI, Gilson Bez Fontana. **Processo de Fabricação**. Cocal do Sul: CMG, 2003, 197p.

MOFORT E.; ENRIQUE J. E. Economia energética e vantagens meioambientais da reutilização de resíduos. **Cerâmica Industrial**, v. 1 n. 4, p.14-20, 1996.

RICHTER, Carlos A.; AZEVEDO NETTO, José Martiniano de. **Tratamento de água**: tecnologia atualizada. São Paulo: Edgard Blücher, 1991, 332 p.

RIELLA, Humberto Gracher. **Cerâmica dos minerais à porcelana**. São Paulo: TecArt, 2010, 157p.

RIPOLI FILHO, Francisco. A utilização do rejeito industrial cerâmico - chamote - como fator de qualidade na fabricação de elementos cerâmicos: um estudo experimental. **Revista Cerâmica**, v. 43 n. 281-282, p.132-138, 1997.

RODRIGUEZ, Adriana Marin et al. Propriedades de matérias-primas selecionadas para a produção de grés porcelanato. **Cerâmica Industrial**, v. 9 n. 1, p.33-38, 2004.

ROSSO, Jeancarlo; CUNHA, Edilene de Souza; ROJAS-RAMÍREZ, Roberto A. Características técnicas e polimento de porcellanatos. **Cerâmica Industrial**, v. 10 n. 4, p.11-14, 2005.

SÁNCHEZ, Enrique. Considerações técnicas sobre produtos de revestimento porcelânico e seus processos de manufatura. Parte I. **Cerâmica Industrial**, v. 8 n.2, p.7-16, 2003.

SARDELLA, Antonio. **Curso de química**. 23. ed. São Paulo: Ática, 1997.

SHREVE, Randolph Norris; BRINK, Joseph Andrew. **Indústrias de processos químicos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1997, 717p.

VIEIRA, C. M. F.; SOUZA, E. T. A. DE; MONTEIRO, S.N. Efeito da incorporação de chamote no processamento e microestrutura da cerâmica vermelha. **Revista Cerâmica**, v. 50 n. 315, p.254-260, 2004.

VIVONA, Daniel. Visão, desafios e novos rumos da cerâmica de revestimento. **Cerâmica Industrial**, v. 5 n. 2, p.17-22, 2000.

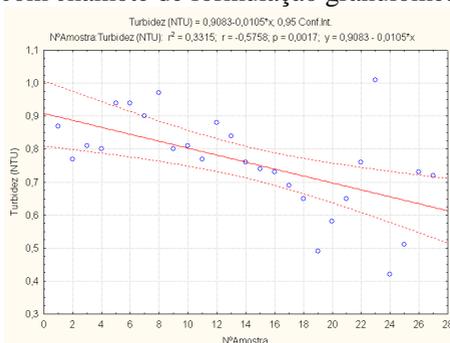
ZANARDO, A.; MOTTA, J. F. M.; CABRAL JR, M.. As Matérias-Primas Cerâmicas: Parte I. **Cerâmica industrial**, São Carlos, v.6, n. 2, p. 28-39, mar/abr 2001.

APÊNDICE

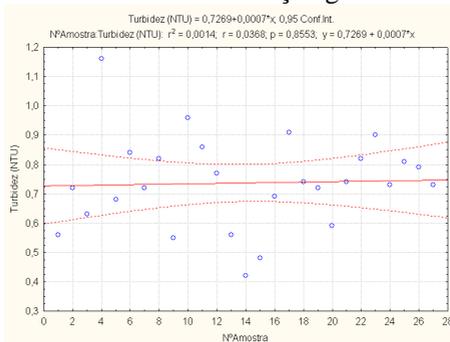
APÊNDICE A

Gráficos do comportamento das filtrações ao longo do tempo

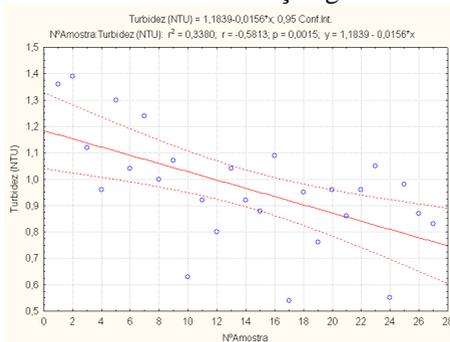
A1. 1ª filtração com chamote de formulação granulométrica média



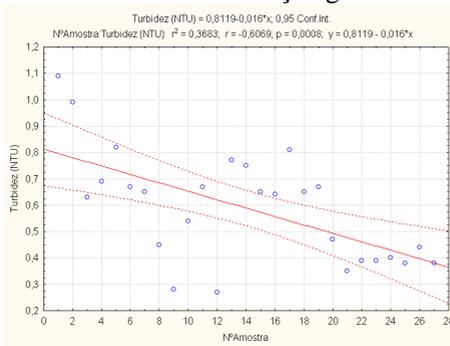
A2. 2ª filtração com chamote de formulação granulométrica média



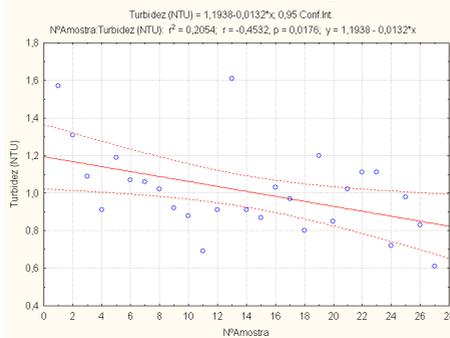
A3. 3ª filtração com chamote de formulação granulométrica média



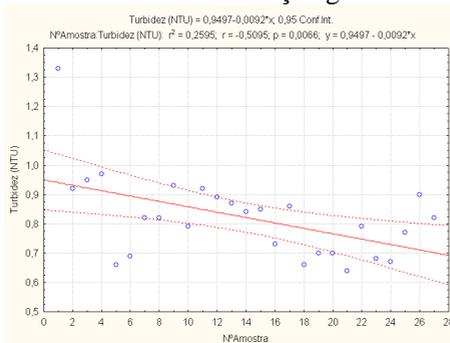
A4. 4ª filtração com chamote de formulação granulométrica média



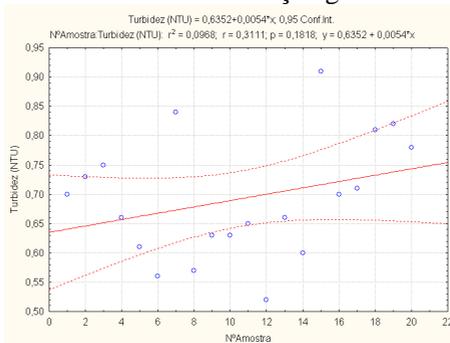
A5. 5ª filtração com chamote de formulação granulométrica média



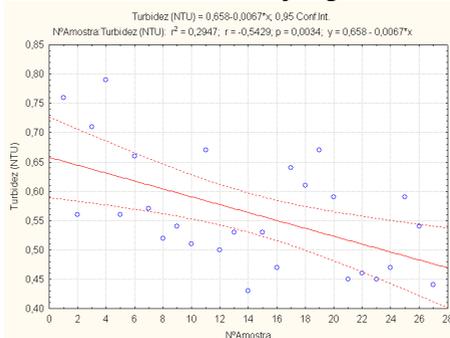
A6. 1ª filtração com chamote de formulação granulométrica grossa



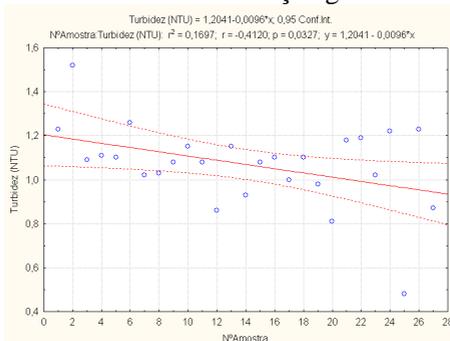
A7. 2ª filtração com chamote de formulação granulométrica grossa



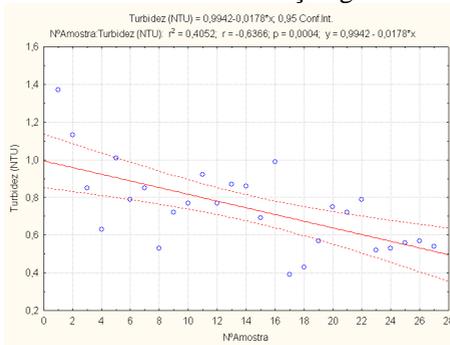
A8. 3ª filtração com chamote de formulação granulométrica grossa



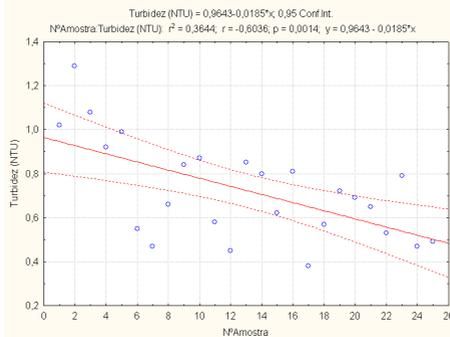
A9. 4ª filtração com chamote de formulação granulométrica grossa



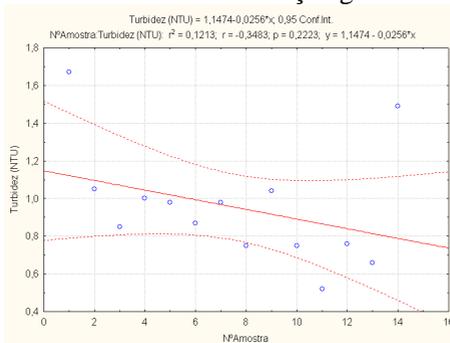
A10. 5ª filtração com chamote de formulação granulométrica grossa



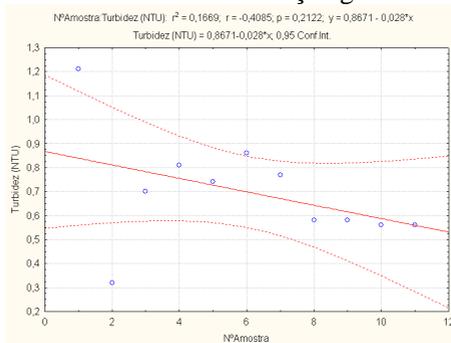
A11. 1ª filtração com chamote de formulação granulométrica fina



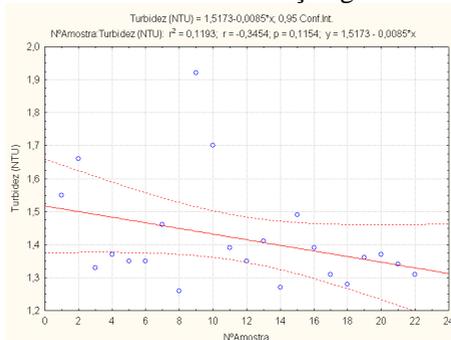
A12. 2ª filtração com chamote de formulação granulométrica fina



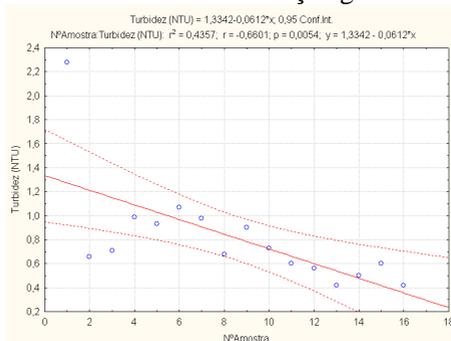
A13. 3ª filtração com chamote de formulação granulométrica fina



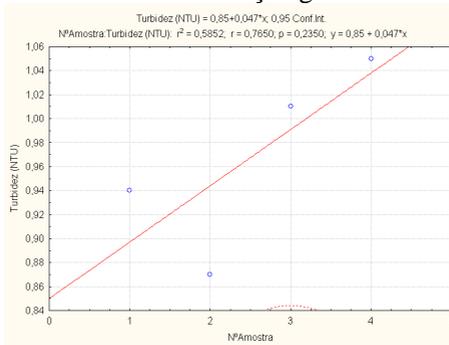
A14. 4ª filtração com chamote de formulação granulométrica fina



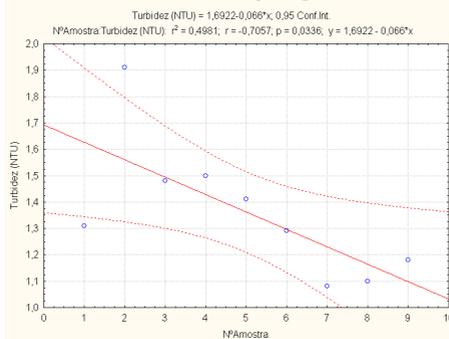
A15. 5ª filtração com chamote de formulação granulométrica fina



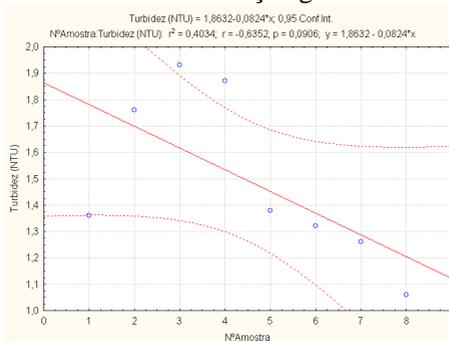
A16. 1ª filtração com areia de formulação granulométrica média



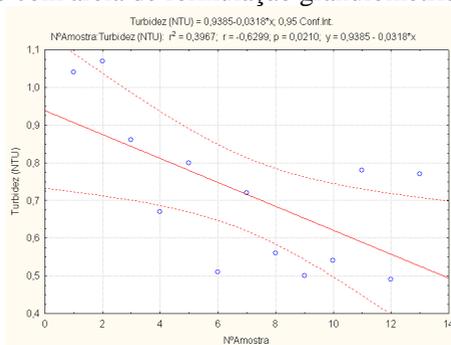
A17. 2ª filtração com areia de formulação granulométrica média



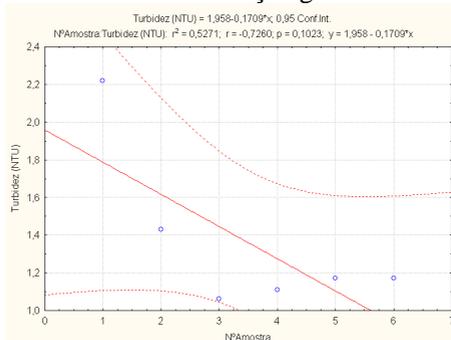
A18. 3ª filtração com areia de formulação granulométrica média



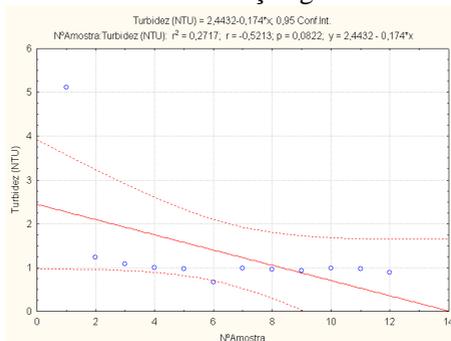
A19. 4ª filtração com areia de formulação granulométrica média



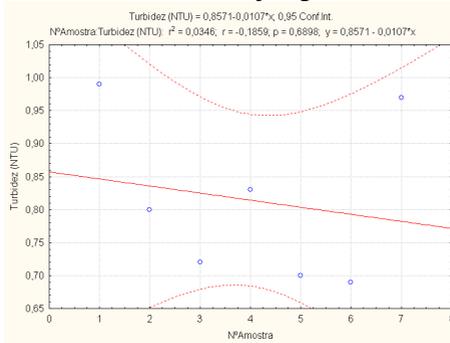
A20. 5ª filtração com areia de formulação granulométrica média



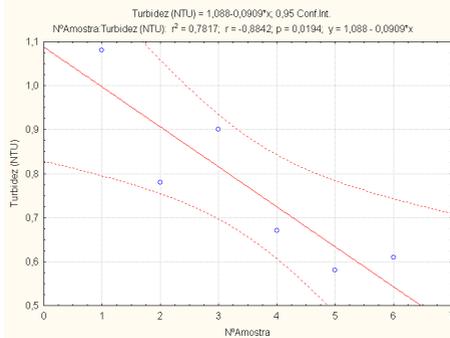
A21. 1ª filtração com areia de formulação granulométrica grossa



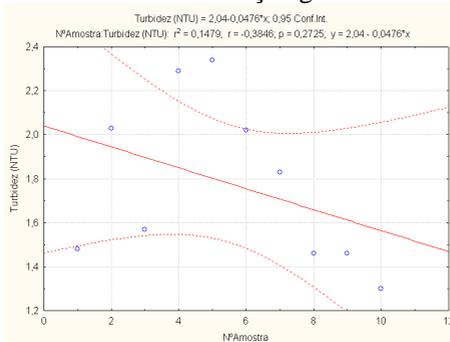
A22. 2ª filtração com areia de formulação granulométrica grossa



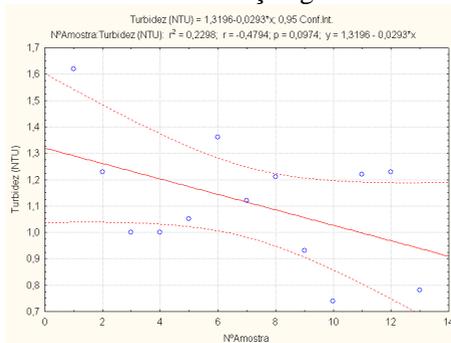
A23. 3ª filtração com areia de formulação granulométrica grossa



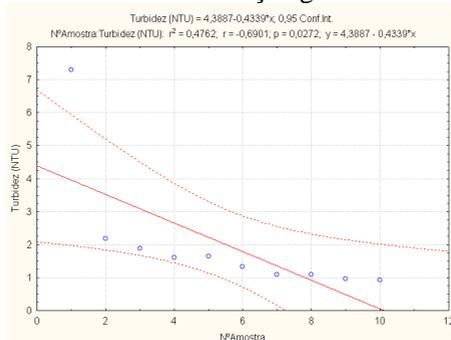
A24. 4ª filtração com areia de formulação granulométrica grossa



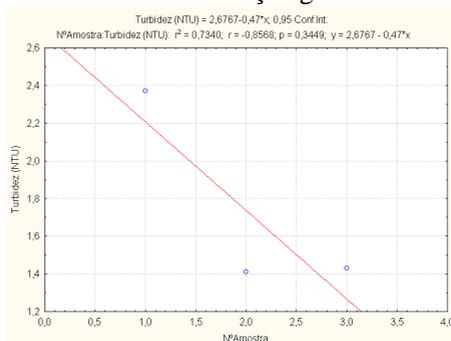
A25. 5ª filtração com areia de formulação granulométrica grossa



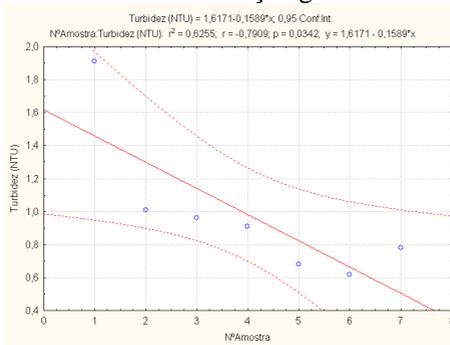
A26. 1ª filtração com areia de formulação granulométrica fina



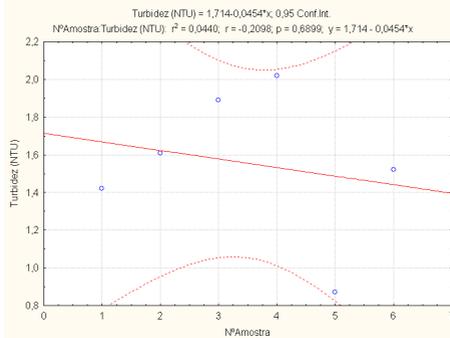
A27. 2ª filtração com areia de formulação granulométrica fina



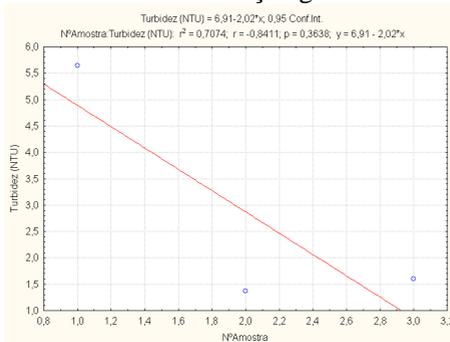
A28. 3ª filtração com areia de formulação granulométrica fina



A29. 4ª filtração com areia de formulação granulométrica fina



A30. 5ª filtração com areia de formulação granulométrica fina



APÊNDICE B
Resumo das filtrações em laboratório

B1. Resumo: filtração com chamote de formulação granulométrica média

Característica	Nº Filtração				
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a
Turbidez Inicial (NTU)	1,13	1,82	2,05	1,15	1,60
Turbidez Média Final (NTU)	0,77	0,72	0,97	0,59	0,96
Desvio padrão - Turbidez	0,13	0,13	0,18	0,21	0,17
Coef. Variação - Turbidez (%)	16,9	18,7	19,1	35,5	17,2
Remoção Turbidez (%)	31,5	60,4	52,9	48,8	39,9
pH Inicial	6,45	6,61	6,26	6,20	6,47
pH Médio Final	6,98	7,17	6,76	6,76	6,91
Desvio padrão - pH	0,06	0,03	0,03	0,07	0,04
Coef. Variação - pH (%)	0,9	0,4	0,5	1,0	0,6
Vazão Média - Entrada (mL/min)	17,3	18,9	17,8	17,1	16,9
Coef. Variação – Vazão entrada (%)	13,9	12,5	13,9	14,1	11,0
Vazão Média - Saída (mL/min)	15,7	17,4	15,1	14,7	14,8
Coef. Variação – Vazão saída (%)	17,0	16,6	18,8	14,2	16,1
Tempo operação (h)	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0

B2. Resumo: filtração com chamote de formulação granulométrica grossa

Característica	Nº Filtração				
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a
Turbidez Inicial (NTU)	1,53	1,25	1,22	2,67	1,83
Turbidez Média Final (NTU)	0,80	0,69	0,56	1,07	0,72
Desvio padrão - Turbidez	0,10	0,10	0,10	0,12	0,19
Coef. Variação - Turbidez (%)	12,8	14,9	17,5	11,1	25,9
Remoção Turbidez (%)	47,6	44,6	53,8	59,7	60,6
pH Inicial	6,63	6,68	6,68	6,41	6,43
pH Médio Final	7,34	7,17	7,13	6,74	6,70
Desvio padrão - pH	0,10	0,03	0,04	0,05	0,03
Coef. Variação - pH (%)	1,4	0,4	0,5	0,8	0,5
Vazão Média - Entrada (mL/min)	18,3	15,5	17,8	17,1	17,4
Coef. Variação – Vazão entrada (%)	18,5	16,1	15,7	17,7	15,3
Vazão Média - Saída (mL/min)	16,8	13,2	16,8	14,2	14,9
Coef. Variação – Vazão saída (%)	17,4	27,6	21,5	19,6	24,0
Tempo operação (h)	9,0	6,7	9,0	9,0	9,0

B3. Resumo: filtração com chamote de formulação granulométrica fina

Característica	Nº Filtração				
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª
Turbidez Inicial (NTU)	1,73	2,31	1,53	2,54	1,78
Turbidez Média Final (NTU)	0,72	0,85	0,66	1,37	0,72
Desvio padrão - Turbidez	0,23	0,17	0,17	0,07	0,21
Coef. Variação - Turbidez (%)	31,2	19,6	25,3	5,4	29,5
Remoção Turbidez (%)	58,2	63,2	57,0	46,2	59,7
pH Inicial	6,54	6,56	6,45	6,49	6,52
pH Médio Final	7,10	7,03	7,11	6,75	6,90
Desvio padrão - pH	0,03	0,05	0,04	0,03	0,04
Coef. Variação - pH (%)	0,5	0,7	0,5	0,4	0,6
Vazão Média - Entrada (mL/min)	17,0	17,1	16,7	16,9	16,1
Coef. Variação – Vazão entrada (%)	18,0	13,4	17,6	17,3	12,9
Vazão Média - Saída (mL/min)	15,0	13,9	11,8	12,9	11,4
Coef. Variação – Vazão saída (%)	18,0	24,5	17,3	16,7	21,2
Tempo operação (h)	8,3	4,7	3,3	7,3	5,3

B4. Resumo: filtração com areia de formulação granulométrica média

Característica	Nº Filtração				
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª
Turbidez Inicial (NTU)	1,13	1,82	2,05	1,15	1,60
Turbidez Média Final (NTU)	0,97	1,35	1,49	0,71	1,19
Desvio padrão - Turbidez	0,08	0,23	0,32	0,20	0,14
Coef. Variação - Turbidez (%)	8,2	17,0	21,3	28,7	12,0
Remoção Turbidez (%)	14,4	25,8	27,2	38,1	25,8
pH Inicial	6,45	6,61	6,26	6,20	6,47
pH Médio Final	6,91	7,11	6,79	6,68	6,96
Desvio padrão - pH	0,02	0,06	0,02	0,02	0,01
Coef. Variação - pH (%)	0,2	0,8	0,4	0,2	0,1
Vazão Média - Entrada (mL/min)	16,2	16,1	17,8	17,4	15,1
Coef. Variação – Vazão entrada (%)	22,0	9,8	14,7	17,6	7,72
Vazão Média - Saída (mL/min)	11,0	13,7	13,9	13,4	13,3
Coef. Variação – Vazão saída (%)	7,4	15,1	13,0	21,0	16,2
Tempo operação (h)	1,3	3,0	2,7	4,0	2,0

B5. Resumo: filtração com areia de formulação granulométrica grossa

Característica	Nº Filtração				
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª
Turbidez Inicial (NTU)	1,53	1,25	1,22	2,67	1,83
Turbidez Média Final (NTU)	0,97	0,81	0,77	1,78	1,07
Desvio padrão - Turbidez	0,05	0,12	0,19	0,37	0,19
Coef. Variação - Turbidez (%)	5,6	15,3	25,0	21,1	17,8
Remoção Turbidez (%)	36,5	34,9	36,9	33,4	41,4
pH Inicial	6,63	6,68	6,68	6,41	6,43
pH Médio Final	7,15	7,07	7,11	6,63	6,65
Desvio padrão - pH	0,09	0,03	0,03	0,04	0,04
Coef. Variação - pH (%)	1,2	0,4	0,4	0,5	0,6
Vazão Média - Entrada (mL/min)	16,2	16,4	16,4	17,2	17,0
Coef. Variação – Vazão entrada (%)	5,5	10,5	8,1	12,3	16,1
Vazão Média - Saída (mL/min)	13,8	12,0	15,0	13,3	13,5
Coef. Variação – Vazão saída (%)	12,5	18,6	8,4	15,1	23,8
Tempo operação (h)	4,0	2,3	2,0	3,3	4,3

B6. Resumo: filtração com areia de formulação granulométrica fina

Característica	Nº Filtração				
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª
Turbidez Inicial (NTU)	1,73	2,31	1,53	2,54	1,78
Turbidez Média Final (NTU)	1,45	1,74	0,84	1,56	2,87
Desvio padrão - Turbidez	0,41	0,55	0,17	0,45	2,40
Coef. Variação - Turbidez (%)	28,1	31,6	20,9	29,0	83,7
Remoção Turbidez (%)	16,2	24,8	45,4	38,5	-61,2
pH Inicial	6,54	6,56	6,45	6,49	6,52
pH Médio Final	6,81	6,93	7,08	6,67	6,91
Desvio padrão - pH	0,08	0,03	0,02	0,03	0,07
Coef. Variação - pH (%)	1,2	0,4	0,3	0,4	1,0
Vazão Média - Entrada (mL/min)	13,7	14,3	15,6	15,4	14,3
Coef. Variação - Vazão entrada (%)	6,4	4,1	13,9	14,0	8,1
Vazão Média - Saída (mL/min)	10,7	10,7	11,0	11,0	9,3
Coef. Variação - Vazão saída (%)	6,6	5,4	17,3	12,9	22,3
Tempo operação (h)	3,0	1,0	2,0	1,7	1,0