

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

DANIEL ERICEIRA CAMPOS

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE LODO DE
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA NA PRODUÇÃO DE CORPOS
CERÂMICOS**

São Luís
2014

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

DANIEL ERICEIRA CAMPOS

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE LODO DE
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA NA PRODUÇÃO DE CORPOS
CERÂMICOS**

Trabalho apresentado ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Estadual do Maranhão como requisito para obtenção do grau de Engenheiro de Produção.
Orientadora: Rossane Cardoso Carvalho, Dra.

São Luís
2014

DANIEL ERICEIRA CAMPOS

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE LODO DE
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA NA PRODUÇÃO DE CORPOS
CERÂMICOS**

Trabalho apresentado ao Curso de Engenharia
de Produção da Universidade Estadual do
Maranhão como requisito para obtenção do
grau de Engenheira de Produção.

Orientadora: Rossane Cardoso Carvalho, Dra.

Aprovada em ____/____/2014.

Banca examinadora:

Dra. Rossane Carvalho Cardoso (UEMA)
Orientadora

MSc. Maria Amália Trindade de Castro
Primeiro Examinador

MSc. Moisés dos Santos Rocha
Segundo Examinador

São Luís
2014

*Aos meus pais, pois sem eles eu nada seria.
Agradeço por todo esforço dedicado a mim durante
todo esse tempo. E a todas as pessoas importantes
da minha vida, que fazem tudo isso valer a pena.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por ter me provido saúde e forças para chegar até este momento, superando todas as dificuldades.

Agradeço à Universidade Estadual do Maranhão e seu corpo docente, que me fizeram pensar fora da caixa. Assim pude ser cada vez mais exigente comigo mesmo.

À minha orientadora Rossane Carvalho, uma das maiores apoiadoras deste trabalho, o qual não poderia ser realizado sem o seu apoio e ensinamentos.

Ao Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI), que cedeu o laboratório para a realização dos experimentos deste trabalho, agradeço também a todos os seus colaboradores que se envolveram diretamente e indiretamente nesta pesquisa.

E a todos que contribuíram para a minha formação profissional, o meu muito obrigado.

“O cansaço físico, mesmo que suportado forçosamente, não prejudica o corpo, enquanto o conhecimento imposto à força não pode permanecer na alma por muito tempo.”

Platão

RESUMO

A problemática da escassez de água potável tem se agravado a cada década no mundo. A quantidade de água consumível no mundo, além de pouca, está mal distribuída. Parte do Oriente Médio, África e partes da América Central já se encontram carentes de água, e esse cenário está tornando a dessalinização da água do mar algo cada vez mais atraente, principalmente para as regiões citadas. Entretanto, a dessalinização da água do mar também possui seus entraves. Os processos de dessalinização de água também são geradores de resíduos. As estações de tratamento de água geram enormes quantidades de lodo sendo necessário buscar alternativas para o reaproveitamento destes resíduos de forma a não agredir o meio ambiente. A presente pesquisa objetiva analisar as alternativas de dessalinização de água no mundo, discorrer a respeito do aproveitamento do seu principal resíduo e verificar, por vias experimentais, a viabilidade da utilização deste na indústria de cerâmica vermelha.

Palavras-chave: Dessalinização; lodo; produto cerâmico; desperdício, São Luís, Maranhão.

ABSTRACT

The problem of water shortage has worsened every decade in the world. The amount of usable water in the world is little and poorly distributed. Part of the Middle East, Africa and Central America are already lacking water, and this scenario is making desalination of seawater something increasingly attractive, especially for the regions mentioned. However, desalination of sea water also has its obstacles. The processes for desalinating water are also generators of waste. The water treatment plants generate enormous amounts of sludge, being necessary to seek alternatives for reusing these wastes in order to not harm the environment. This research aims to analyze alternatives of seawater desalination in the world, discoursing about the use of their main residue and verify, by experimental way, the feasibility of using this waste in the ceramic industry.

Keywords: Dessalination, Sludge, Ceramics, Waste, São Luis, Maranhão.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do processo de osmose e osmose reversa.	23
Figura 2 - Esquema mostrando pré-tratamento da água do mar até o processo de dessalinização por osmose reversa.	25
Figura 3 - Lodo armazenado em big bags na Usina Termelétrica Itaqui Geração de Energia.	26
Figura 4 – Demonstração de aparelho para determinar o módulo de resistência à flexão e à carga de ruptura	33
Figura 5 - Peneira 325, utilizada no ensaio de resíduos.	37
Figura 6 - Forno Mufla Q318M.....	38
Figura 7 - Corpos de prova preparados no laboratório do SENAI-MA com a utilização de 3% de lodo	39
Figura 8 - Prensa para teste de flexão modelo DL-10000	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição das águas no mundo.....	18
Tabela 2 - Características de um lodo de ETA e de uma argila usada para fabricação de produtos de cerâmica vermelha.	29
Tabela 3 – Proporções lodo-argila a serem utilizadas nos corpos de prova.	31
Tabela 4 - NBR 10005:2004 Lixiviado	35
Tabela 5 - NBR 10005:2004 Lixiviado - Parâmetros Inorgânicos.....	35
Tabela 6 - NBR 10006:2004 Solubilizado - Parâmetros Inorgânicos	36
Tabela 7 - Resultados do Ensaio de Retração Linear	40
Tabela 8 - Resultados do Ensaio de Perda ao Fogo.....	40
Tabela 9 – Módulo de Ruptura à Flexão	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ETA	Estação de Tratamento de Água
DME	Destilação Multi-estágios
MRF	Módulo de Ruptura à Flexão
OMS	Organização Mundial da Saúde
PF	Perda ao fogo
PTA	Pré-tratamento da Água do Mar
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 JUSTIFICATIVA	15
3 METODOLOGIA	16
4 CONSIDERAÇÕES SOBRE ÁGUA	17
4.1 Água Destilada	18
4.2 Água Potável	18
4.3 Água do Mar	19
5 DESSALINIZAÇÃO DA ÁGUA DO MAR	19
5.1 Congelamento	20
5.2 Dessalinização Térmica	21
5.3 Destilação Multi-estágios	21
5.4 Osmose Reversa	22
6 CLARIFICAÇÃO DA ÁGUA DO MAR	24
6.1 Caracterização do lodo de ETA	25
7 REAPROVEITAMENTO DO LODO DE ETA	26
7.1 Compostagem do Solo	27
7.2 Cultivo de Grama Comercial	27
7.3 Fabricação de Cimentos	28
7.4 Incorporação do Lodo de ETA em Cerâmica Vermelha	28
8 PROCESSO DE INCORPORAÇÃO DO LODO DE ETA EM CORPOS CERÂMICOS: PREPARAÇÃO DE CORPOS E PROVA E ENSAIOS TECNOLÓGICOS	30
8.1 Procedimentos na Preparação dos Corpos de Prova	30
8.2 Ensaio Tecnológico nas Misturas	31
8.2.1 Densidade Geométrica	31
8.2.2 Perda ao Fogo (PF)	32
8.2.3 Módulo de Ruptura à Flexão (MRF)	32
8.2.4 Absorção de Água	33
8.2.5 Retração Linear	34
9 ANÁLISE PRELIMINAR DO LODO DE ETA	34
9.1 Lixiviado	35

9.2 Ensaio de Solubilização	35
10 PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS	36
11 RESULTADOS E ENSAIOS.....	38
12 CONCLUSÃO.....	43
REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que a quantidade de água própria para consumo no mundo, além de pouca, é mal distribuída. Parte do Oriente Médio, África e partes da América Central já se encontram carentes de água, e esse cenário está tornando a dessalinização de água do mar algo cada vez mais atraente.

Os processos de dessalinização de água, entretanto, são geradores de resíduos e as estações de tratamento de água (ETA) que fazem parte deste processo, geram consideráveis quantidades de lodo, sendo necessário buscar alternativas para seu reaproveitamento de forma a minimizar possíveis impactos negativos ao meio ambiente. Neste contexto, um setor que apresenta potencial para absorver os resíduos dos processos de dessalinização, bem como outros tipos de resíduos, é o de cerâmica vermelha. De fato, a literatura mostra que é perfeitamente possível a reciclagem de resíduos industriais como constituintes de massas cerâmicas usadas na fabricação de produtos cerâmicos para a construção civil (PAIXÃO, 2005).

No entanto, pesquisas realizadas com lodo de estações de tratamento de água são bastante específicas visto que o lodo tem suas características muito particulares, e pode possuir diferentes características, dependendo de onde ele é coletado. Ao considerar o lodo proveniente da água do mar, observa-se que o resíduo proveniente da água coletada nas bacias maranhenses não vai possuir as mesmas características químicas que o resíduo proveniente de água coletada no mar do Caribe, por exemplo. Logo, não resultará em produtos finais com as mesmas propriedades físico-químicas. Levando esta diferença em conta, pode-se imaginar que nem todo lodo pode ser utilizado como matéria prima na confecção de corpos cerâmicos.

Diante disto, esta pesquisa buscou manipular materiais e processos a fim de obter resultados superiores aos resultados obtidos por Moruzzi (2008) ao estudar a incorporação do lodo gerado nem uma (ETAII) do município de Rio Claro-SP em argila utilizada para a produção de cerâmica vermelha. Para tanto, este trabalho foi realizado na cidade de São Luís, MA, mais precisamente na ETA de uma termoeletrica que realiza um pré-tratamento da água do mar para seu posterior envio a uma estação de dessalinização.

Como objetivo, buscou-se avaliar a alternativa de utilização de lodo residual do processo de pré-tratamento de água (PTA) do mar na fabricação de blocos cerâmicos e demais materiais cerâmicos voltados ao setor de construção civil, de forma que suas propriedades

físico-químicas não sejam bruscamente alteradas, atendendo as normas regulamentadoras.

Para tornar este objetivo possível, buscou-se então:

- Identificar as principais formas de dessalinização de água existentes e viáveis atualmente;
- Conhecer o processo de clarificação de água;
- Identificar as características do lodo residual do pré-tratamento da água do mar no ambiente de estudo;
- Apresentar o processo de criação de corpos de prova em cerâmica com a adição do lodo de água do mar;
- Conhecer as principais características desejáveis em produtos, conforme resultados dos experimentos;
- Analisar a viabilidade da utilização de lodo de água do mar proveniente da costa maranhense na fabricação de materiais cerâmicos.

2 JUSTIFICATIVA

No contexto geral de economia de materiais e da minimização de impactos ao meio ambiente, o reaproveitamento de resíduos torna-se preponderante. Pensando assim, buscou-se, com esta pesquisa, contribuir para o desenvolvimento de uma forma ecologicamente correta e economicamente viável de promover a utilização de um resíduo que, atualmente, está sendo massivamente destinado a aterros sanitários.

O reaproveitamento de lodo no setor de cerâmica pode render economia de milhões gastos com tratamento de água, pois são altos os custos de armazenamento e disposição final do resíduo. Uma estação de tratamento de água de médio porte gasta anualmente centenas milhares de reais apenas com o acondicionamento do lodo gerado.

Pesquisas já realizadas mostram que é possível o aproveitamento do lodo em quantidades relevantes. Segundo Duarte (2008), os resultados obtidos sobre os tijolos maciços fabricados com lodo proveniente da região de Goianinha, no estado de Rio Grande do Norte, apresentaram uma dosagem máxima de 20% a qual pode ser incorporada à massa cerâmica atendendo, simultaneamente, aos requisitos técnicos e ambientais, sendo que em dosagens mais baixas e acima desse percentual, o material final apresentou problemas, como perda de resistência, perda significativa da massa, fissuras, cantos frágeis e falhas nas arestas. Em nenhuma das amostras houve qualquer tipo de alteração no odor dos tijolos.

A necessidade de um estudo dirigido e aprofundado para cada caso se deve à diferença existente na composição da água e, conseqüentemente, do lodo, nos diversos lugares do mundo. Isto pode ser inferido quanto à água do mar. A região litorânea maranhense, por exemplo, possui água do mar de alta turbidez, o que requer um tratamento adequado para a remoção da turbidez, o que gera um lodo com mais resíduos.

Desta forma, tem-se como questionamento principal da presente pesquisa: “Há viabilidade técnica na utilização do lodo de água do mar como matéria prima de materiais cerâmicos?”.

3 METODOLOGIA

A rigor, uma pesquisa pode ser classificada a partir de vários critérios. Tendo em vista a natureza deste trabalho, por exemplo, pode-se dizer que se trata de uma pesquisa aplicada, uma vez que busca gerar conhecimentos de aplicação prática para solução de um problema específico (SILVA e MENEZES, 2001).

De acordo com os meios usados para a consecução dos objetivos, este trabalho foi desenvolvido por meio de pesquisa bibliográfica, documental, experimental e estudo de caso (GIL 1991 Apud SILVA e MENEZES, 2001). Isto por que foram utilizadas fontes bibliográficas que serviram de referência teórica para o trabalho; foram obtidos dados sobre a constituição do lodo da estação de pré-tratamento de água do mar a partir da empresa que a mantém; foram realizados experimentos em laboratório para identificação das características do corpo de prova cerâmico construído com adição de lodo e, finalmente, o estudo de caso é caracterizado pelo estudo de um lodo com suas características muito próprias, diferenciadas de lodos de condições de tratamento semelhantes.

Logo, buscou-se inicialmente, realizar a coleta de amostras do lodo da estação de tratamento de água de uma usina termelétrica, para, em seguida, serem confeccionados corpos cerâmicos para fins de análises e ensaios. Ressalte-se que todos os ensaios foram realizados de acordo com a norma técnica ABNT NBR 13818:1997, que indica especificações e métodos de ensaio para placas cerâmicas de revestimento.

A confecção dos corpos cerâmicos, análises laboratoriais e ensaios tecnológicos foram realizados com apoio do SENAI, unidade de São Luís, Maranhão, que cedeu o laboratório de cerâmica e pessoal técnico para a realização de todos os experimentos.

4 CONSIDERAÇÕES SOBRE ÁGUA

É de conhecimento geral que a água, substância química composta por hidrogênio e oxigênio, é a mais vital das substâncias presentes na natureza, e constitui importante parte de todas as matérias. Variações climáticas, geográficas e pluviométricas são o que determinam a presença de água em maior ou menor quantidade durante um ciclo. A água está diretamente ligada à identidade dos ambientes e paisagens, sendo responsável pela formação e regeneração de oceanos, rios, desertos e florestas (TELLES, 2010).

A água é responsável pela sobrevivência de animais, plantas e todas as substâncias em circulação no meio celular que constituem um ser vivo. Isto faz com que a disponibilidade de água defina as funções e estrutura de um ambiente. Várias operações da natureza precisam da água para se efetivarem, como por exemplo a passagem dos minerais que percorrem as raízes e caule em direção às folhas. Estes minerais precisam estar em solução aquosa para que possam circular. A água também está presente nas mais variadas composições químicas, células e no abastecimento de matéria e energia, indispensáveis às funções vitais de nutrição, reprodução e proteção do organismo (BRANCO, 1999).

Ainda segundo Branco (1999), a água também é a substância predominante nos seres vivos, além dela ser essencial para a estabilização da temperatura corporal destes, atua como veículo de eliminação e assimilação da maioria das substâncias pelos organismos. Os seres vivos normalmente obtêm água por meio de ingestão direta, retirando esta de alimentos, ou através de reações metabólicas, como a degradação de gorduras. Por outro lado, perdem água por meio de transpiração, sistema urinário, excretor e também pela respiração. Pode-se concluir, portanto, que a água é imprescindível como recurso natural renovável, sendo o item mais essencial para o desenvolvimento dos ecossistemas, e, por consequência, considerada um fator vital para a população terrestre.

Sabe-se que mais de 71% da superfície do planeta terra é coberta por água, sendo que aproximadamente 97% estão nos oceanos, no estado líquido. A água presente nos oceanos possui muito cloreto de sódio e outros minerais, e por isso é considerada água salgada, e não pode ser utilizada para consumo. Entretanto, a água em estado líquido aparece também nos rios, lagos e nas represas, e também está infiltrada nos solos, rochas, nuvens e nos seres vivos. Nesses casos ela apresenta uma concentração de sais geralmente inferior à água do mar. É chamada de água doce e corresponde a aproximadamente 2,6% do total de água presente na terra. Deve ser destacado que do total de água doce do planeta, cerca de 1,8% está em estado

sólido, formando grandes massas de gelo nas regiões próximas dos polos e no topo das montanhas mais altas. As águas subterrâneas correspondem á 0,96% da água doce, o restante está disponível em rios e lagos. De maneira geral tem-se a disponibilidade percentual disposta na Tabela 1 seguinte (USGS, 2014).

Localização	Porcentagem
Oceanos e mares	97%
Geleiras inacessíveis	2%
Rios, lagos e fontes subterrâneas	1%

Tabela 1 - Distribuição das águas no mundo.

Fonte: USGS (2014).

De acordo com a quantidade de sais presente em sua estrutura, PALZ (1981) classifica as águas como: água destilada, água do mar e água potável.

4.1 Água Destilada

Água destilada é aquela obtida por meio de condensação do vapor, obtida pela evaporação ou ebulição. Na natureza este processo ocorre naturalmente, sendo esta água precipitada em forma de chuva.

A água dessalinizada apresenta composição química variada em função do processo de desmineralização. Porém, é aceitável como salinidade média de 0,2%, dureza total (quantidade de cálcio e magnésio) de 34ppm (partes por milhão) e cloretos de 30ppm. Água da chuva por sua vez é esperada como sendo muito branda, com baixo teor de sólidos totais e tendo um pH um pouco abaixo do neutro, sendo bastante corrosivo para muitos metais (PALZ, 1981).

4.2 Água Potável

Os padrões da potabilidade da água no Brasil estão fixados pela portaria nº 518 de 25/03/2004. Neste trabalho tomou-se com referência a Organização Mundial da Saúde (OMS) que considera potável a água que cujo teor salino não supera 500mg/l, ou seja, 500ppm.

4.3 Água do Mar

A água do mar é a água que se encontra nos oceanos. Esta água é rica em sais como Sulfato, Sódio, Magnésio, Cálcio e Potássio. Segundo PALZ (1981) a água do mar tem uma concentração salina média de 3,5%. Afirmo ainda que haja grandes variações como caso do teor salino do Mar Báltico que é de 0,7% ao passo que a concentração no Golfo Persico ou Árabe é de aproximadamente 4,3%. Quando a concentração dos sais de uma solução for maior que a da água do mar, essa solução é denominada salmoura.

5 DESSALINIZAÇÃO DA ÁGUA DO MAR

A dessalinização da água do mar consiste no processo de tratamento da água salobra para retirada de impurezas e sais a fim de torná-la consumível aos seres humanos. As primeiras tentativas de dessalinização de água do mar ocorreram na década de 1920 e resumiam-se no processo de destilação, onde grandes quantidades de água do mar eram colocadas em enormes colunas e aquecidas, de forma que a água pura era evaporada, deixando como resíduo os sais indesejáveis. O vapor era coletado e condensado, transformando-se em água potável. Como a água era aquecida, tinha-se então eliminado os riscos de contaminação por microrganismos.

De acordo com Rios e Berger (2002), em 1928 foi instalada uma estação dessalinizadora pelo processo da destilação artificial, com uma produção diária de 50 m³ de água potável. Esta unidade foi instalada na ilha caribenha de Curaçao. Nos Estados Unidos, ainda de acordo com os autores, as primeiras iniciativas para o aproveitamento da água do mar deram-se em 1952, quando o Congresso Americano aprovou a Lei Pública número 448. A finalidade da referida Lei seria criar meios que reduzissem o custo da dessalinização da água do mar. Isto fez surgir o Departamento de Águas Salgadas.

No Brasil, as primeiras experiências com destilação solar foram realizadas em 1970 pelo Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA). Em 1987 a Petrobrás passou a dessalinizar a água do mar para atender às suas plataformas marítimas. Para tanto, usou o processo da osmose reversa, tendo esse processo sido usado, pioneiramente, no Brasil (RIOS; BERGER, 2002).

Atualmente, existem quatro principais processos de dessalinização de água do mar: congelamento, dessalinização térmica, destilação multi-estágios e osmose reversa, sendo estas últimas correspondentes a 90% dos processos utilizados no mundo.

5.1 Congelamento

No congelamento, a água a tratar é pré-resfriada por troca de calor e entra numa torre de congelamento ou “freezer”, onde a pressão é mantida a patamares onde a água salina entra em ebulição e libera vapor. Este calor de evaporação é removido da água resfriada e dá início à formação dos cristais de gelo. O líquido residual é o resíduo salino concentrado, que através de trocadores de calor, volta à temperatura ambiente e é afastado do processo, com exceção de uma parcela que retorna ao “freezer”, para controle da fluidez do rejeito (SOUZA, 2002).

O processo consiste na raspagem dos cristais de gelo na direção do derretedor, que para impedir a entrada de ar e facilitar a entrada dos cristais, mantém a mesma pressão do “freezer”. O gelo é distribuído no reservatório de derretimento e entra em contato com o vapor de água do “freezer”, que é condensado, derretendo o gelo. A água produzida está à temperatura próxima da de congelamento, o que é aproveitado, bombeando-a para o armazenamento, através de trocadores de calor que vão resfriar a água de alimentação que está entrando no processo. As entradas de calor são compensadas para que seja o equilíbrio térmico do sistema, estas entradas são derivadas das seguintes fontes: energia aplicada ao compressor principal, trabalho de bombeamento e penetração de calor da atmosfera. Para o isolamento destas entradas de calor, normalmente é utilizado um sistema comum de refrigeração, que remove calor da água de alimentação (SOUZA, 2002).

Segundo Alves (2008) um pequeno número de plantas de congelamento foi construído nos últimos quarenta anos. A maioria dos exemplos significantes de dessalinização por congelamento foram ensaios experimentais utilizando energia solar construídos na Arábia Saudita em 1985.

5.2 Dessalinização Térmica

A dessalinização térmica é um dos processos mais arcaicos, imitando a circulação natural da água. O modo mais conhecido e simples, a destilação solar, é utilizada em lugares quentes, com a construção de grandes tanques cobertos com vidro ou outro material transparente, de forma que a luz o atravesse, assim a água do líquido bruto evapora, os vapores se condensam na parte interna do vidro, transformando-se novamente em água, que escorre para um sistema de recolhimento. Dessa forma, a água é separada de todos os sais e impurezas. Em lugares frios ou com carência de espaço, esse processo pode ser feito gerando-se calor através de energia. Neste caso, a melhor solução, é a utilização de energia solar, que é mais barata, não consome recursos não renováveis como petróleo e carvão mineral e não agride o meio ambiente (SOARES, 2004).

O destilador solar é um equipamento de uso extremamente simples. Além de possuir razoável eficiência no atual quadro de aproveitamento da energia solar, tem manutenção simples, praticamente não possui custos operacionais e purifica água contaminada ou salgada, transformando-a em água adequada para o consumo (STEC - PB, 1984).

As técnicas de destilação solar são usadas há mais de cem anos. A primeira aplicação conhecida sobre destilação solar data de 1872, no norte do Chile, para suprir com água potável a população de mineiros que trabalhavam nas minas de salgema da região. Este destilador, composto de unidades de 60 metros com uma área total de 4.400 metros foi até 1908, a única fonte de água potável para a comunidade mineira. O destilador utilizou uma bacia preta rasa para reter água salgada e absorver radiação solar (KREITH e KREIDER, 1978).

Vários países, como o Kuwait, a Arábia Saudita e o Qatar, que apresentam problemas de abastecimento de água, construíram destiladores de água salgada, seja com o uso da energia solar ou com a queima de derivados de petróleo (SOARES, 2004).

5.3 Destilação Multi-estágios

O processo de destilação multi-estágios (DME) se baseia no princípio de evaporação. Na destilação multi-estágios, água do mar é evaporada através da redução da pressão e do aumento da temperatura. Segundo Alves (2008), em cada estágio acontece uma

troca de massa e calor entre a água condensada e a água ascendente. O aquecimento da água do mar é realizado a baixa pressão obtida por uma turbina a gás. A água quente escoada dentro dos estágios de um evaporador. Em cada estágio, a pressão é mantida abaixo da chamada temperatura de saturação. Na entrada do primeiro estágio, a água do mar ferve rapidamente devido à baixa pressão. O restante da solução passa então para o próximo estágio. Assim, a destilação é realizada gradativamente pela produção de vapor de água com uma redução progressiva da pressão em cada estágio. O vapor da água é então esfriado e condensado, passando pelos enrolamentos de um condensador, para produzir o líquido destilado. O calor fornecido ao condensador é utilizado para aquecer a corrente de entrada no evaporador. O destilado produzido e coletado, então, é bombeado para um tanque de armazenamento. A água dessalinizada produzida pelo processo DME contém normalmente cerca de 2 a 10 ppm de sólidos dissolvidos.

5.4 Osmose Reversa

Na osmose reversa, a água escoada no sentido reverso ao da osmose, ou seja, a água vai sofrer uma pressão artificial e passar por uma membrana, ficando retidos os sais e impurezas desta água.

Na prática, a água salina é transferida para um recipiente fechado com uma bomba, lá ela é pressurizada contra a membrana. Uma parte da água passa através da membrana e água restante resulta em uma concentração de sal mais elevada. Ao mesmo tempo, uma parte desta água é escoada sem passar através da membrana. Sem este escoamento controlado, a água pressurizada continuaria a aumentar a concentração de sal, criando problemas como precipitação de sais supersaturados e aumento da pressão osmótica através das membranas. A quantidade de água escoada para ser consumida neste fluxo de salmoura varia de 20 a 70% do fluxo de alimentação, dependendo da quantidade de sal da água do abastecimento (ALVES, 2008).

A Figura 1 esquematiza este processo. Da esquerda para a direita, pode-se observar que duas soluções, uma salina e outra sem sal, são separadas por uma membrana semipermeável (a); em seguida, a água pura dilui a salgada até que seja atingido o equilíbrio osmótico (b) e, por fim, a aplicação de uma pressão superior à diferença de pressão hidrostática inverte o processo (c) (MOURA, 2008).

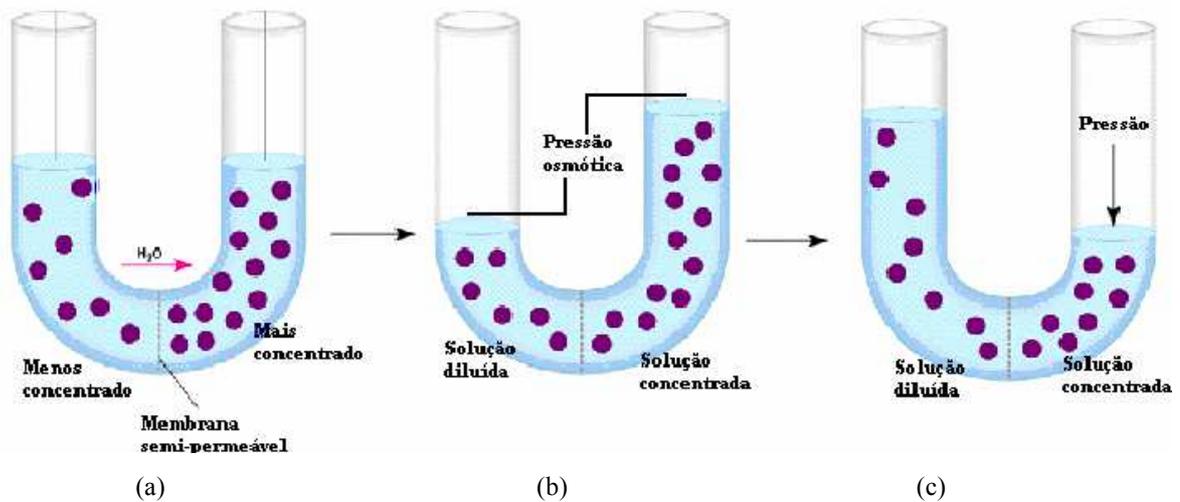


Figura 1 - Representação do processo de osmose e osmose reversa.

Fonte: MOURA, 2008; p. 10.

Ainda de acordo com Moura (2008), na osmose reversa, as membranas são um dos elementos mais importantes; sua função característica de seletividade induz ao desenvolvimento de membranas para a dessalinização em escala industrial.

Segundo Moura (2008), o processo de osmose reversa possui vantagens em relação aos processos tradicionais de dessalinização e apresenta-se como a melhor alternativa existente para certas regiões e, ainda, mostra ser mais econômico que caminhões pipa. Para este autor, as principais vantagens são:

- baixo custo de investimento;
- baixo consumo energético;
- ocupa área muito reduzida para instalação;
- aproveitamento dos efluentes;
- qualidade constante da água produzida;
- processo contínuo;
- flexibilidade para futuras instalações;

Por ser um processo abrangente, a osmose reversa pode ser utilizada em diversos casos, desde a dessalinização de água até a filtração de soluções. Moura (2008) afirma que a dessalinização de águas para produção de água potável é a maior aplicação da osmose reversa e já se encontra consolidada mundialmente, representando cerca de 34% dos 15 bilhões de m³/dia de água que são dessalinizadas. Outras aplicações são listadas a seguir.

- Tratamento de águas;

- Recuperação e produtos em efluentes;
- Ultrafiltração de leite integral e desnatado para aumentar o rendimento na produção de queijo;
- Concentração de sucos: laranja, tomate, maçã;
- Separação e concentração de microsolutos tais como: antibióticos, vitaminas e ácidos orgânicos;
- Tratamento da água na produção de papel e celulose;
- Tratamento de água ultrapura para hemodiálise;
- Fracionamento e concentração de albumina de ovos, proteínas animais, peixes e vegetais;
- Remoção de contaminantes (Ex.: purificação de ureia);
- Concentração e recuperação de corantes, lubrificantes, etc.

6 CLARIFICAÇÃO DA ÁGUA DO MAR

A clarificação da água do mar, ou pré-tratamento da água (PTA) é um tratamento da água salina para torná-la adequada para o processo de dessalinização. O processo de clarificação efetua a remoção dos sólidos de suspensão na água, assim como todas as matérias orgânicas e afins. Quando a dessalinização é feita por osmose reversa, o processo de clarificação da água se torna ainda mais importante, pois o excesso de turbidez da água pode danificar os filtros do sistema, ocasionando altos custos de manutenção.

Por este processo, a água é succionada diretamente do mar por um duto de captação e flui através de grades e peneiras rotativas, para a separação de partículas maiores. A água segue para um tanque clarificador, onde recebe dosagem de uma substância floculante, como por exemplo, o policloreto de alumínio. Com esta dosagem, parte dos sólidos torna-se lodo no fundo dos clarificadores e é succionada por uma bomba de lodo, que a envia a um tanque adensador, que separa ainda mais a água do lodo. Esse lodo concentrado é enviado a centrifugas que o transformam em lodo desidratado. A água retirada do adensador e das centrifugas retorna para as peneiras.



Figura 2 - Esquema mostrando pré-tratamento da água do mar até o processo de dessalinização por osmose reversa.

6.1 Caracterização do lodo de ETA

O lodo de clarificação é o conglomerado de matéria impura retirada da água do mar durante o processo de clarificação. Este lodo possui características físico-químicas bem semelhantes ao lodo residual de estações de tratamento de água (ETA) para saneamento básico, visto que o processo de clarificação é o mesmo realizado nestas estações de tratamento.

De acordo com suas características, o lodo de ETA é classificado como: não perigoso, de classe II e não inerte, conforme descreve a ABNT NBR 10004:2004. Por isso, deve ser acondicionado e identificado adequadamente. O material deve ser desidratado para poder ser destinado a aterros de classe II, para remoção de líquidos livres e minimização da umidade.

O correto acondicionamento do material é de extrema importância para a saúde do solo onde o mesmo está sendo disposto, pois o lodo pode conter resíduos metálicos, além de substâncias tóxicas. Portanto, na maioria dos casos, o lodo é acondicionado em big-bags¹ (Figura 3).

¹ Sacos de armazenagem confeccionados com material de alta resistência, utilizados para contenção, desaguamento e armazenagem de lodo.



Figura 3 - Lodo armazenado em big bags na Usina Termelétrica Itaquí Geração de Energia.

7 REAPROVEITAMENTO DO LODO DE ETA

O tratamento do lodo proveniente de estações de tratamento de água (ETA) vem, recentemente, sendo uma alternativa cada vez mais viável para fins comerciais. Além disso, o alto custo para disposição de lodos em aterros² e legislações cada vez mais restritivas tem levado as empresas a buscarem alternativas para o reaproveitamento deste resíduo.

Apesar do esforço em função do reaproveitamento de lodo, ainda é notável que a maior parte deste resíduo ainda seja descartada em aterros sanitários, redes de esgoto ou corpos hídricos. Segundo a AWWARF (1999), pelo menos 68% do lodo gerado em estações de tratamento de água nos Estados Unidos está sendo descartado.

² Os aterros destinados à disposição do lodo de ETA demandam grande espaço e, por isso, promovem desmatamento, prejudicando a fauna e a flora da região.

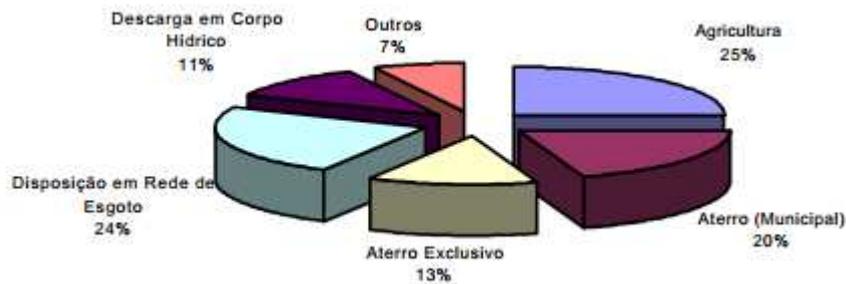


Gráfico 1 - Disposição final de lodos de ETAs nos Estados Unidos.
Fonte: AWWARF (1999).

Segundo Tsutiya, (2001), atualmente as atividades mais comuns onde estão sendo incorporados lodos de ETAs são a compostagem do solo, o cultivo de grama comercial e a fabricação de cimentos.

No entanto, outra opção que vem se mostrando uma excelente alternativa é a incorporação do lodo em corpos de cerâmica vermelha. O que pode trazer, inclusive, benefícios ao produto final.

7.1 Compostagem do Solo

Uma das alternativas que está sendo amplamente utilizada nos Estados Unidos é a aplicação do lodo diretamente no solo. Tsutiya (2001) lista como alguns benefícios associados à aplicação dos lodos de ETAs em solos agrícolas: a melhoria estrutural do solo; ajuste de pH; adição de traços de minerais; aumento da capacidade de retenção de água e melhoria das condições de aeração do solo. Entretanto, alguns estudos têm demonstrado que o lodo de ETAs, se aplicado ao solo agrícola, apresenta tendência de reagir e indisponibilizar o fósforo presente no solo à planta. Além disso, a toxicidade do alumínio pode ser um problema, principalmente em solos com pH acima de 6,5. As baixas concentrações de matéria orgânica e de nutrientes presentes nos lodos de ETAs tornam desinteressante sua aplicação no solo.

7.2 Cultivo de Grama Comercial

O cultivo de grama comercial possui um campo vasto de aplicação, dentre as alternativas estão: campos de futebol, grama para jardinagem, parques, cemitérios e jardinagem de rodovias. Este cultivo de grama normalmente é realizado em 5 etapas:

preparação do solo, semeadura, crescimento da grama, colheita e transporte. O lodo pode ser aplicado na fase líquida ou após a desidratação. O lodo líquido pode ser aplicado na fase de crescimento da grama e na fase de preparação do solo (TSUTIYA, 2001).

7.3 Fabricação de Cimentos

Segundo Tsutiya, (2001), A utilização do lodo no processo de fabricação de cimento é algo viável, já que o lodo normalmente contém elementos que são adicionados durante o processo de fabricação do cimento. Assim, o lodo deve ser introduzido no processo de fabricação do cimento na etapa de pré-homogeneização das matérias primas. O teor de sólidos para esta aplicação deve ser maior ou igual a 50%. A presença de sódio ou óxidos de potássio no lodo diminui as concentrações de álcali no cimento produzido, o que é considerado algo bom, pois as altas concentrações de álcali no cimento causam expansão e fissuras nas estruturas de concreto.

7.4 Incorporação do Lodo de ETA em Cerâmica Vermelha

Os processos de incorporação de resíduos sólidos industriais em matriz de cerâmica vermelha vêm sendo amplamente estudados. Atualmente este resíduo vem sendo aproveitado em misturas para fabricação de blocos cerâmicos que poderão ser utilizados na construção civil. As misturas de resíduos na matriz cerâmica são de diversas proporções e, após vários ensaios consegue-se estabelecer misturas dentro de padrões aceitáveis (COSIN *et al.*, 2002).

No caso particular de incorporação de lodo de ETA para fabricação de tijolo (WENG; LIN; CHIANG, 2003) algumas vantagens começam pela própria semelhança de composição química entre as argilas de modo geral e os lodos, de acordo com a Tabela 2.

Características	Lodo úmido	Lodo seco	Argila
pH	7,19	7,27	8,09
Densidade (g/cm ³)	1,16	1,75	2,52
Porcentagem de mistura	84,1	41,0	1,4
Perda ao fogo (800±50 ⁰ C - 3h)%	94,6	76,6	7,9
Metais			
Cd (mg/kg)	3	5	<0,1
Cr (mg/kg)	537	1713	16
Cu (mg/kg)	29	212	85
Co(mg/kg)	10	24	5
Fe (mg/kg)	5265	18070	8530
Ni(mg/kg)	167	1131	20
Pb (mg/kg)	3	35	<0,1
Zn(mg/kg)	264	628	98

Tabela 2 - Características de um lodo de ETA e de uma argila usada para fabricação de produtos de cerâmica vermelha.

Fonte: WENG; LIN; CHIANG (2003).

As composições químicas do lodo de ETAs dependem dos materiais utilizados durante o processo de tratamento da água, principalmente na fase de clarificação. A Tabela 2 mostra uma acentuada perda ao fogo do lodo úmido em relação à argila (PAIXÃO, 2005).

A Perda ao Fogo (PF) é uma variável atribuída às matérias orgânicas e inorgânicas contidas na mistura, assim como outras substâncias inorgânicas que compõem o lodo e a argila, matérias que são queimadas durante o processo. Este parâmetro pode ter uma notável variação dependendo da qualidade da água que está sendo coletada na estação de tratamento de água (PAIXÃO, 2005).

Os elementos químicos que constituem o lodo e a argila e a presença de água em sua estrutura são fatores importantes na qualidade do bloco cerâmico, onde o limite de Atterberg deve ser determinado para atingir uma plasticidade adequada na mistura lodo-argila e, assim, construir um bloco cerâmico dentro dos padrões (WENG; LIN; CHIANG, 2003).

Em geral, a incorporação de lodo de ETA provoca diminuição da tensão de ruptura à flexão dos blocos cerâmicos, sendo que esta diminuição aumenta quanto maior a quantidade de lodo incorporada à massa cerâmica. A absorção de água e a porosidade dos blocos cerâmicos queimados podem apresentar uma tendência de aumentar com a quantidade de lodo incorporado. O lodo apresenta um comportamento de um enchimento não plástico, porém, a proporção de lodo e a temperatura de queima são fatores importantes que determinam a qualidade do bloco cerâmico. A mistura de 10% a 20% de lodo em mistura com argila torna possível o uso de lodos de ETAs em matriz de argila para produzir blocos cerâmicos, contribuindo para a solução de disposição adequada desses lodos (PAIXÃO, 2005).

Deve-se ressaltar que a utilização do resíduo não traz impactos devido a sua toxicidade. Esta visão torna-se bem clara ao se imaginar as telhas de uma residência, que

podem, durante uma precipitação de chuva, liberar componentes nocivos ao ser humano e ao meio ambiente.

8 PROCESSO DE INCORPORAÇÃO DO LODO DE ETA EM CORPOS CERÂMICOS: PREPARAÇÃO DE CORPOS E PROVA E ENSAIOS TECNOLÓGICOS

8.1 Procedimentos na Preparação dos Corpos de Prova

A preparação das amostras deve ser feita em várias proporções lodo/argila a fim de se analisar o melhor resultado. Os procedimentos que levaram, em um estudo específico, a uma amostra ótima de cerâmica, com propriedades físico-químicas semelhantes às confeccionadas sem a adição de lodo (MORUZZI, 2008), foram:

- a) A preparação teve início com a colocação do lodo na estufa a uma temperatura de 100°C, por 24 horas;
- b) Terminado esse período a massa de lodo foi levada a um moinho de rotor a martelos fixos da marca Servitech, modelo CT-058 e o material passante na malha ABNT 60 (abertura 0,250mm), foi separado e posteriormente adicionado à argila. Ressalta-se que a argila, já estava preparada, pois havia sido moída em moinho de martelo da marca Tigre, até granulometria passante na malha ABNT 32;
- c) Em uma balança pesaram-se quatro amostras com mesma massa (200g), porém composições diferentes A1, A2, A3 e A4. Sendo que A1 apresentava 190g de argila e 10g de lodo (5%), A2 tem 170g de argila e 30g de lodo (15%), A3 140g de argila e 60g de lodo (30%) e A4 apresentava 200g de argila. Para melhor homogeneização, todas as amostras foram peneiradas dez vezes;
- d) Os teores de umidade das amostras foram determinados através da pesagem em uma balança de umidade da marca OHAUS MB200;
- e) Com os valores obtidos ajustaram-se as massas com a umidade desejada. Assim, a umidificação foi o passo seguinte para a preparação dos corpos de prova, sendo que as quatro amostras foram umedecidas até um teor de 8% de água, e permaneceram em repouso por 24 horas para melhor homogeneização;
- f) Passado esse período as amostras foram novamente pesadas na balança de umidade e todas se enquadravam na faixa de teor de água desejada, entre 7,8 e 8,2%;

- g) Assim, preparou-se quinze corpos de provas (cinco de cada concentração) com molde nas dimensões de 7,2 x 2,2cm. Os corpos de prova foram prensados em um aparelho da marca Charloit a uma pressão de 3,5 ton. Depois de prensados, estes foram identificados com códigos e levados para a estufa por 24 horas;
- h) Após o processo de secagem, é realizada a queima a 950°C por cerca de 3 horas.
- i) Os resultados obtidos com a amostra com 5% de lodo incorporado à argila foram superiores aos demais. Apesar de ser um bom resultado, a intenção do presente projeto é trabalhar na preparação do resíduo e do processo em si, a fim de obter resultados superiores. Também serão feitos experimentos com proporções intermediárias, nas amostras a serem realizadas neste projeto serão consideradas as seguintes proporções lodo/argila:

Amostra	A1	A2	A3	A4
Lodo	0%	5%	7,5%	15%
Argila	100%	95%	92,5%	85%

Tabela 3 – Proporções lodo-argila a serem utilizadas nos corpos de prova.
Fonte: MORUZZI, 2008.

8.2 Ensaio Tecnológicos nas Misturas

Segundo as recomendações da NBR 13818/97, os ensaios nos corpos cerâmicos realizados por Moruzzi (2008) foram os de densidade geométrica, perda ao fogo, ruptura à flexão, absorção de água e retração linear.

8.2.1 Densidade Geométrica

Após o processo de secagem, é feita uma análise de densidade geométrica. A função deste teste é fazer uma comparação da densidade do corpo de prova, que possui 0% de lodo em sua composição (A1), com os demais corpos de prova. Assim, pode-se constatar uma possível retração brusca do material, que pode indicar alteração na porosidade, o causaria perda de resistência no produto final.

Para calcular a densidade geométrica das misturas lodo-argila e somente da argila, serão colocados os corpos de prova em um dessecador por 30 minutos, após terem sido retirados da estufa. Com um paquímetro, serão medidas as três dimensões de cada corpo de prova, sendo elas: Comprimento (Cs); Largura (Ls); Espessura (Es). Medindo o peso com precisão, se obtém na fórmula a densidade conforme a Equação 1.

$$\text{Densidade geométrica} = \frac{\text{massa (g)}}{C_s \times L_s \times E_s} \quad (1)$$

8.2.2 Perda ao Fogo (PF)

Após a queima a 950°C deverá ser realizado o ensaio de perda ao fogo. Este ensaio consiste na determinação da perda de massa dos corpos de prova após a queima, conforme demonstrado na equação 2.

$$PF = \frac{(M_s - M_q) \times 100}{M_s} \quad (2)$$

Onde:

M_s = massa seca à 100°C, e M_q = massa queimada à 950°C.

8.2.3 Módulo de Ruptura à Flexão (MRF)

Neste ensaio é utilizado um aparelho especial conforme mostrado na Figura 4, o qual aplica uma força definida e controlada sobre o centro do corpo de prova.

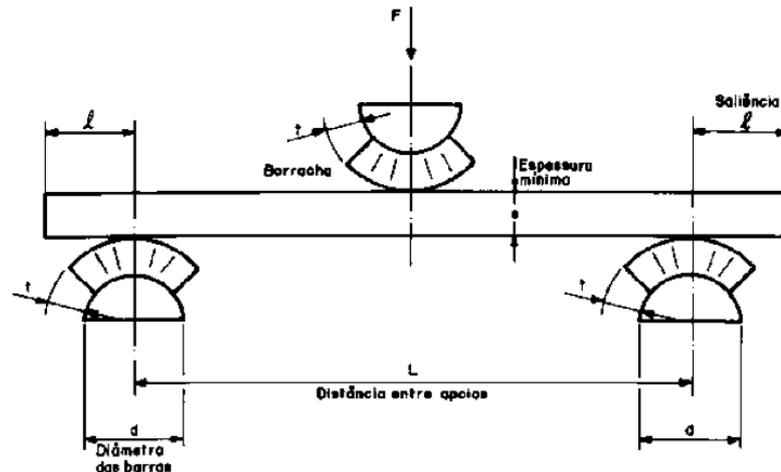


Figura 4 – Demonstração de aparelho para determinar o módulo de resistência à flexão e à carga de ruptura

Fonte: ABNT NBR 13818:1997, Placas Cerâmicas para Revestimento – Especificações e Métodos de Ensaio.

Quando a peça rompe, o aparelho fornece valores da força aplicada, sendo determinado o MRF (Módulo de Ruptura à Flexão). A equação 3 mostra o cálculo para de obter o resultado (a fórmula é específica para as condições do aparelho no momento da leitura).

$$MRF = \frac{La \times f}{Er^2 \times Lr} \quad (3)$$

Sendo:

La= leitura feita no aparelho

f= fator de escala que varia de acordo com o peso utilizado no aparelho;

Er= espessura, e;

Lr= largura, ambas as dimensões são medidas no local de ruptura do corpo de prova.

8.2.4 Absorção de Água

Para o ensaio de absorção água serão utilizados os corpos de prova rompidos do ensaio de ruptura à flexão. É necessário pesá-los para medir a massa anterior. Os corpos de prova serão submersos em recipientes com água, que serão fervidos durante duas horas. Após a fervura os corpos de prova são resfriados em água corrente e em seguida são secados (com um pano). Após a secagem, serão novamente medidas as massas dos produtos, a fim de se obter um coeficiente de absorção de água, conforme equação 4. Sendo o limite máximo

admissível para telhas 20% de absorção, segundo a “ABNT NBR 15310 - Componentes cerâmicos e Telhas - Terminologia, Requisitos e Métodos de Ensaio”.

$$AA (\%) = \frac{(Pu - Ps) \times 100}{Ps} \quad (4)$$

Sendo: Pu = peso úmido; Ps = peso seco.

8.2.5 Retração Linear

A retração linear é definida como a tendência que a mistura tem em diminuir de volume pela perda de umidade por secagem e queima, e pela diminuição da porosidade, de acordo com a equação 5.

$$RLQ (\%) = \frac{(Lq - Ls) \times 100}{Ls} \quad (5)$$

Sendo: Lq= comprimento após queima, e; Ls= o comprimento após secagem.

Segundo Moruzzi (2008), a importância deste ensaio deve-se ao fato de a retração que os produtos sofrem após secagem e queima é consequência da eliminação de água utilizada para a formação e modelagem do produto.

Após a água ser eliminada ela deixa vazios, o que permite a aproximação de partículas argilosas devido às forças de atração eletrostáticas, gerando aglomeração. Após a queima, a retração torna-se consequência dos mecanismos de sinterização (aproximação das partículas), a qual ocorre pois na temperatura de queima não ocorre fusão dos minerais componentes, fazendo com que não ocorra a eliminação de uma parcela dos poros existentes na mistura seca (MORUZZI, 2008).

9 ANÁLISE PRELIMINAR DO LODO DE ETA

Para avaliar, caracterizar e classificar um resíduo sólido é necessário realizar amostragem estatística do material, para verificar a sua homogeneidade. A Norma ABNT NBR 10004:2004 estabelece alguns ensaios que fornecem dados para a classificação do resíduo sólido ou do solo a ser analisado.

Deve-se ressaltar que os ensaios analíticos das amostras usados nesta pesquisa foram disponibilizados pela Usina Termelétrica Itaqui Geração de Energia que, a seu pedido, foram realizados pela empresa “Operator – Meio Ambiente”.

9.1 Lixiviado

A norma ABNT NBR 10005:2004 descreve todos os passos deste ensaio de maneira a proporcionar o efeito de percolação dos elementos contidos no resíduo sólido ou solo contaminado, e então analisando os elementos indicados ou impostos pela ABNT NBR 10004:2004 (Tabelas 4 e 5).

Parâmetros	Unidade	Resultados	Limites Máximos
Quantidade Amostra Lixiviada	g	30	-
Volume da Solução Extratora	mL	600	-
Tempo Total de Lixiviação	h	18	16-20
pH Final do Extrato do Lixiviado	-	4,99	-

Tabela 4 - NBR 10005:2004 Lixiviado

Parâmetros	Unidade	Limite de Detecção	Limite de Quantificação	Resultados	Limites Máximos
Arsênio	mg/L	0,00100	0,00300	< 0,0010	1
Bário	mg/L	0,01000	0,05000	0,0404	70
Cádmio	mg/L	0,00050	0,00100	< 0,00050	0,5
Chumbo	mg/L	0,00100	0,00500	0,0094	1
Cromo Total	mg/L	0,00100	0,00500	< 0,001	5
Fluoreto	mg/L	0,05000	0,10000	0,726	150
Mercúrio	mg/L	0,00005	0,00010	< 0,00005	0,1
Prata	mg/L	0,00100	0,00500	< 0,0010	5
Selênio	mg/L	0,00100	0,00300	< 0,0011	1

Tabela 5 - NBR 10005:2004 Lixiviado - Parâmetros Inorgânicos

9.2 Ensaio de Solubilização

A norma ABNT NBR 10006:2004 descreve todos os passos deste ensaio de maneira a proporcionar o efeito de solubilização dos elementos contidos no resíduo sólido ou solo contaminado, e então analisando os elementos indicados ou impostos pela ABNT NBR 10004:2004.

Parâmetros	Unidade	Limite de Detecção	Limite de Quantificação	Resultados	Limites Máximos
Alumínio	mg/L	0,01000	0,05000	1,799	0,2
Arsênio	mg/L	0,00100	0,03000	< 0,0010	0,01
Bário	mg/L	0,01000	0,05000	0,047	0,7
Cádmio	mg/L	0,00050	0,00100	< 0,0005	0,005
Chumbo	mg/L	0,00100	0,00500	< 0,0010	0,01
Cianeto	mg/L	0,00500	0,01000	< 0,0050	0,07
Cloreto	mg/L	1,00000	5,00000	10989,2	250
Cobre	mg/L	0,00100	0,05000	< 0,0010	2
Cromo Total	mg/L	0,00100	0,00500	< 0,0010	0,05
Fenóis (Índice de Fenóis)	mg/L	0,00100	0,00200	0,007	0,01
Ferro	mg/L	0,00100	0,00500	0,5154	0,3
Fluoreto	mg/L	0,05000	0,10000	< 0,050	1,5
Manganês	mg/L	0,01000	0,02000	0,0112	0,1
Mercúrio	mg/L	0,00005	0,00010	< 0,00005	0,01
Nitrato	mg/L	0,05000	0,10000	3,001	10
Prata	mg/L	0,00100	0,00500	< 0,0010	0,05
Selênio	mg/L	0,00100	0,00300	< 0,0010	0,01
Sódio	mg/L	0,10000	0,50000	2270	200
Sulfato	mg/L	1,00000	5,00000	1527,1	250
Surfactantes	mg/L	0,05000	0,10000	0,09	0,5
Zinco	mg/L	0,01000	0,05000	5	5

Tabela 6 - NBR 10006:2004 Solubilizado - Parâmetros Inorgânicos

Os níveis de alumínio, cloreto, ferro, sódio e sulfato resultaram em valores acima dos especificados na ABNT NBR 10004:2004. Porém, vale lembrar que neste ensaio, o critério para a seleção dos parâmetros foi o impacto a ser gerado no lençol freático, portanto o resultado desta análise não significa que uma eventual fabricação de material cerâmico traria malefícios aos seres humanos. Entretanto, as alterações nos teores de metais como alumínio e ferro podem trazer malefícios ou benefícios na resistência do material cerâmico final.

10 PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS

Após a coleta do lodo, que foi realizada na Usina Termelétrica Itaqui Geração de Energia, o lodo foi encaminhado ao laboratório do SENAI em São Luís, MA, para início de confecção das amostras. Porém, o lodo foi primeiramente deixado por 24 horas em uma estufa, onde foi removida 68,2% de sua umidade.

A preparação das amostras foi realizada utilizando uma proporção de 3% de lodo para 97% de argila, a qual foi cedida pela empresa CERITA. A argila utilizada é de boa procedência sendo de qualidade excelente. Tanto a argila quanto o lodo passaram por um ensaio de resíduos, utilizando uma peneira 325 (Figura 5), onde ficaram retidos as massas de 2,7% da argila e 0,8% do lodo.



Figura 5 - Peneira 325, utilizada no ensaio de resíduos.

A queima do material cerâmico, realizada após secagem por 24 horas, foi realizada em um forno Mufla modelo QUIMIS Q318M. O Mufla é um equipamento muito utilizado na química para a realização de calcinação de substâncias. O equipamento se baseia na utilização de resistências capazes de elevar a sua temperatura interna a patamares acima de 1000 °C. Este tipo de forno é encapsulado com um material refratário, evitando que o calor interno se propague ao ambiente, portanto é o equipamento ideal para a utilização na queima de corpos de prova cerâmicos em laboratório.



Figura 6 - Forno Mufla Q318M
Fonte: QUIMIS.

No total foram confeccionados 11 corpos de prova, destinados para a realização dos diversos ensaios. Sendo uma parte destes destinados para a quebra no ensaio de ruptura. Todos os corpos de prova foram preparados com 10 centímetros de comprimento e com um peso de 173 gramas. O Quadro 1 demonstra resumidamente os processos secagem e queima, necessários para a preparação de corpos cerâmicos.

Secagem	Queima
Realizada em estufa por um período de 24 horas a uma temperatura de 100 °C.	A 1000 °C em forno Mufla.

Quadro 1 – Resumo dos processos de secagem e queima dos corpos de prova

11 RESULTADOS E ENSAIOS

Os corpos de prova preparados apresentaram coloração avermelhada após a queima, o que indica que a utilização do lodo não alterou o elemento estético destes. O ruído de impacto entre os corpos é agudo, semelhante ao de materiais produzidos sem a utilização do lodo, o que indica uma boa resistência.



Figura 7 - Corpos de prova preparados no laboratório do SENAI-MA com a utilização de 3% de lodo

Após uma primeira e bem sucedida análise visual, foram realizados os ensaios tecnológicos dos corpos de prova, os quais foram realizados segundo recomendação da norma ABNT NBR 13818 (1997).

A determinação pós-queima, realizada após a queima dos corpos de prova a 100°C, consistiu inicialmente nos ensaios de retração linear e de absorção de água. Segundo Moruzzi (2008), esses dois ensaios são importantes devido ao fato de que a retração que os produtos sofrem após queima e secagem é consequência da eliminação de água utilizada para a formação e modelagem do produto. A água, depois de ser eliminada, deixa vazios que permite a aproximação de partículas argilosas devido às forças de atração eletrostáticas, o que gera aglomeração. Após a queima, a retração torna-se da aproximação de partículas, que ocorre por difusão no estado sólido, uma vez que nessa temperatura não ocorre fusão dos minerais componentes, ou seja, a eliminação de uma parcela dos poros existentes na mistura seca, o que é indesejável, por exemplo, para materiais de revestimento.

O ensaio de retração linear foi realizado após o resfriamento dos corpos de prova, e seu resultado foi de acordo com o esperado, obtendo-se médias de 1,75%. Segundo Paixão (2005), normalmente uma boa qualidade de bloco cerâmico possui este coeficiente abaixo de 8%. Esta retração ocorre no corpo de forma tridimensional, alterando o seu volume quando submetido a processo de sinterização.

Corpo de Prova	1	2	3	4	5	6	7	8
Comprimento Antes da Queima (cm)	9,27	9,2	9,32	9,33	9,3	9,17	9,29	9,23
Comprimento Após a Queima (cm)	9,17	9,09	9,03	9,09	9,1	9,07	9,14	9,12
Retração Linear (%)	1,07	1,19	3,11	2,57	2,15	1,09	1,61	1,19

Tabela 7 - Resultados do Ensaio de Retração Linear

Quanto ao ensaio de Absorção de Água (AA), este foi realizado imergindo-se os corpos de prova em um tanque de água por um período de 24 horas. Após isso, foi feita a comparação sua massa de antes com a massa atual (após a imersão). Todos os corpos de prova apresentaram coeficientes inferiores ao máximo recomendado pela ABNT NBR 15310, que é de 20%. A média total para os corpos de prova foi de 15%.

O ensaio de Perda ao Fogo (PF), que indica a perda de massa em função do aumento da temperatura foi também realizado logo após a queima dos corpos de prova. Foram obtidos valores satisfatórios, obedecendo a uma média de 6%. Segundo Paixão (2005), a perda ao fogo aceitável para um bloco cerâmico é de até 15%. A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos nas misturas.

Corpo de Prova	1	2	3	4	5	6	7	8
Massa Queimada (g)	132,4	132,2	132,5	132,9	133,5	133,3	132,4	132
Massa Seca (g)	141	140,7	141,2	141,6	141,8	141,5	141	140,3
Perda ao Fogo (%)	6,10	6,04	6,16	6,14	5,85	5,80	6,10	5,92

Tabela 8 - Resultados do Ensaio de Perda ao Fogo

A determinação do Módulo de Ruptura à Flexão (MRP) foi realizada com auxílio de uma prensa para teste de flexão modelo DL-10000, a qual possui capacidade para 1000 kgf (10 kN).



Figura 8 - Prensa para teste de flexão modelo DL-10000

Os resultados obtidos podem ser verificados na tabela 9. A média do MRP foi de 9,046 MPa. Os valores estabelecidos pela ABNT NBR 15270, para fabricação de blocos e para 15310, para telhas são de MRP > 2 MPa para tijolos maciços, MRP > 5,5 MPa para blocos perfurados, e de MRP > 6,5 MPa para telhas. Infere-se, então, que os valores foram excelentes para ambos os casos.

Número	Força Máxima (kgf)	MRP (MPa)
1	92,95	8,72
2	101,54	9,67
3	92,86	8,93
4	94,75	8,87
5	96,5	9,18
6	94,25	8,98
7	92,95	9,11
8	92,07	8,9

Tabela 9 – Módulo de Ruptura à Flexão

O gráfico 2 demonstra a força exercida pela prensa durante o processo nos oito corpos de prova.

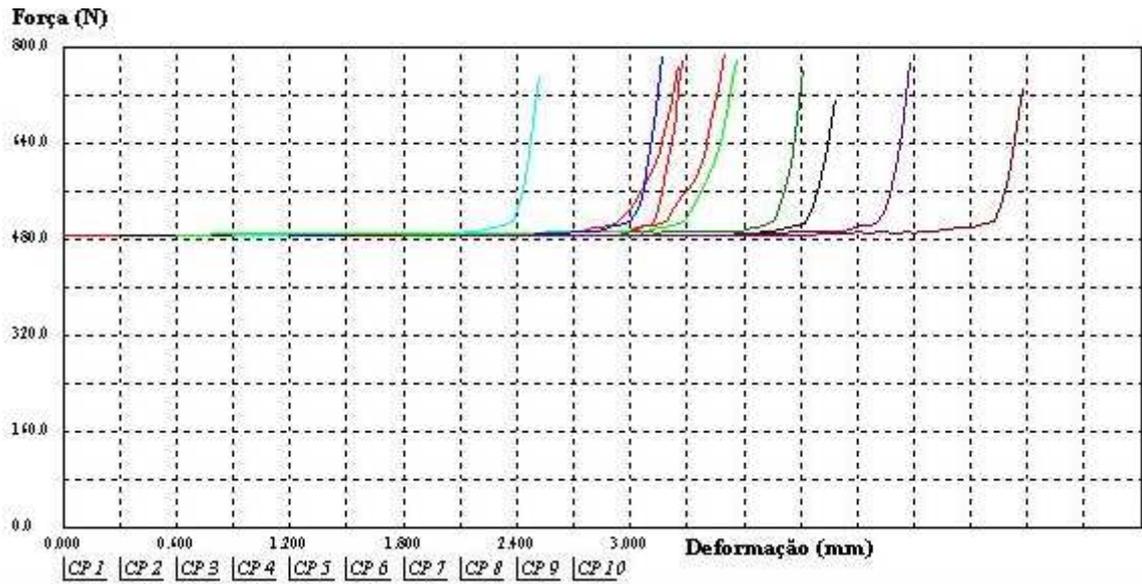


Gráfico 2 - Elevação de carga exercida pela prensa para ensaio de MRP

12 CONCLUSÃO

A presente pesquisa propôs analisar a alternativa de utilização do lodo proveniente da água do mar como insumo na fabricação de corpos cerâmicos, tratando também sobre os processos que geram este resíduo e a importância deles.

Discorreu-se a respeito dos processos de dessalinização de água, com foco no processo de osmose reversa, devido a este ser o processo mais utilizado para este e outros fins. Este método, por ser extremamente delicado, necessita de uma água demasiadamente pura e limpa, sendo obrigatório o processo de clarificação desta para que ela atinja a turbidez adequada para o processo. Esta turbidez, formada por impurezas, resume-se ao lodo da água do mar, que, nesta pesquisa, foi caracterizado e especificado com a finalidade de conhecermos a sua composição e os eventuais malefícios que este poderia trazer ao produto cerâmico. Entretanto, constatou-se que, analiticamente, o lodo não possui teor significativo de contaminantes a ponto de trazer malefícios ao ser humano se utilizado em proporções razoáveis na cerâmica.

Os corpos de prova confeccionados com a adição de lodo de água do mar apresentaram ótimos resultados nos ensaios tecnológicos. Utilizando-se como ferramenta os meios bibliográficos, documentais, experimentais e também o estudo de caso, pôde-se concluir que a fabricação de um produto com a mistura proposta é totalmente viável, uma vez que este atende a todos os requisitos impostos pelas normas regulamentadoras.

Apesar de a pesquisa ter demonstrado a eficiência do lodo para tal propósito, ainda há grandes possibilidades a serem exploradas no campo. O trabalho abordou de maneira genérica o corpo cerâmico, sem focar em um fim específico deste, como telha, bloco cerâmico ou bloco de revestimento. Além disso, a incorporação de proporções maiores de lodo pode trazer resultados semelhantes ou até melhores aos materiais, dependendo da utilização final do mesmo. A alteração de variáveis do processo, como a temperatura de queima, pode garantir resultados diferentes para cada objetivo.

REFERÊNCIAS

ALVES, Renata. **Estudo sobre a dessalinização de águas salobras utilizando a energia solar**. Uberlândia, 2008. 30p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Classificação de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 13818**: Placas cerâmicas para revestimento – Especificações e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR 15270**: Componentes cerâmicos. Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação — Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15310**: Componentes cerâmicos e Telhas - Terminologia, Requisitos e Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro, 2004.

AWWARF. **Commercial Application and Marketing of Water Plant Residuals**. American Water Works Association Research Foundation, 1999.

BRANCO, S.M. **Água, Meio Ambiente e Saúde. Águas Doces no Brasil**. São Paulo: Escrituras Editora, 1999 p. 227, 248.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências**. Portaria GM/MS No 518, de 25 de março de 2004.

COSIN, V.de F.J.Kozievitch, D.T.Tavares, M.M.G.R.Vianna,S.M.Toffoli, P.de Souza santos, F.R.Valenzuela diaz. **“Incorporação de Lodo de Estação de Tratamento de Água a massa Cerâmica”** Anais do 46º congresso Brasileiro de Cerâmica – São Paulo SP (2002) 26 - 29.

DUARTE, A. C. L. **Incorporação de lodo de esgoto na massa cerâmica para a fabricação de tijolos maciços: uma alternativa para a disposição final do resíduo.** (111f.) Dissertação apresentada ao programa de pós graduação de engenharia sanitária - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social.** 3. ed. São Paulo: Atlas, 1991. 207 p.

KREITH, F., KREIDER, J. F. Principles of Solar Engineering. **Series in Thermal and Fluids Engineering, Hemisphere Publishing Corporation,** Estados Unidos da América, 1978.

MOURA, J.P. **Aplicações do processo de osmose reversa para o aproveitamento de água salobra do semi-árido nordestino.** XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Campina Grande, 2008. 25p.

MORUZZI, Rodrigo. **Incorporação do lodo gerado na Estação de tratamento de água (ETAII) do município de Rio Claro-SP em argila utilizada para a produção de cerâmica vermelha.** In: 4º Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais, 2008.

PAIXÃO, Luiz. **Aproveitamento de Lodo de Estação de Tratamento de Água em Cerâmica Vermelha,** 2005. Tese de mestrado – REDEMAT, Minas Gerais, 2005.

PALZ, W. **Energia solar e fontes alternativas,** 1a ed, São Paulo, Editora Hemus-Livraria Editora Ltda, 358 p, 1981.

QUIMIS. **Forno Mufla Microprocessado - Q318M.** Disponível em: <<http://www.quimis.com.br/produtos.php?cat=4&sub=23&prod=118>>. Acesso em: 11 de junho de 2014.

RIOS, J.L.P.; BERGER, S.G. (2002) **Estudos Sócio-Econômicos e de Demanda de Água para a RMRJ.** Seminário Bacia Hidrográfica do Rio Guandu. Problemas e Soluções. Seropédica-RJ. UFRRJ/SERLA. Cd-rom.

SECRETARIA DOS TRANSPORTES, ENERGIA E COMUNICAÇÕES DA PARAÍBA. **Projeto Água Pura por Destilação Solar.** Coordenadoria de Energia, Pernambuco, 1984.

SILVA, E. L. MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação.** 3. ed. Florianópolis: Laboratório de Ensino a Distância da UFSC, 2001.

SOARES, Clarrissa. **Tratamento de água unifamiliar através da destilação solar natural utilizando água salgada, salobra e doce contaminada.** Florianópolis, 2004. 110p.

SOUZA, Luiz. **Análise térmica de um dessalinizador de múltiplo efeito para obtenção de água potável.** 2002.

TELLES. **Reúso da água:** conceitos, teorias e práticas. 2a edição. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2010.

TSUTIYA, M. T. **Aproveitamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água do Estado de São Paulo.** In: 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001, João Pessoa. Anais do 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro : ABES, 2001.

USGS - U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Water Science for Schools home page.** Disponível em <<http://ga.water.usgs.gov/edu>>. Acesso em: 1 de abril de 2014.

WENG, C., LIN, D., CHIANG, P. **Utilization of sludge as brick materials.** Advances in Enviromental Research n° 679, 685. 2003