

INCORPORAÇÃO DA BIOMASSA SECA DE *Salvinia auriculata* AUBL.  
PROVENIENTE DO PROCESSO DE FITORREMEDIAÇÃO EM  
CERÂMICA VERMELHA

**GEOVANA CARLA GIRONDI DELAQUA**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES / RJ

MAIO - 2016

INCORPORAÇÃO DA BIOMASSA SECA DE *Salvinia auriculata* AUBL.  
PROVENIENTE DO PROCESSO DE FITORREMEDIAÇÃO EM  
CERÂMICA VERMELHA

**GEOVANA CARLA GIRONDI DELAQUA**

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais.”

Orientador: Prof. D.Sc. Carlos Maurício Fontes Vieira

CAMPOS DOS GOYTACAZES / RJ

MAIO - 2016

INCORPORAÇÃO DA BIOMASSA SECA DE *Salvinia auriculata* AUBL.  
PROVENIENTE DO PROCESSO DE FITORREMEDIAÇÃO EM  
CERÂMICA VERMELHA

**GEOVANA CARLA GIRONDI DELAQUA**

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais”

Aprovada em 23 de maio de 2016.

Comissão Examinadora:

---

Prof.: José Nilson França de Holanda (D. Sc., Eng. dos Materiais) - UENF

---

Prof.<sup>a</sup>: Márcia Giardinieri de Azevedo (D. Sc., Eng. e Ciência dos Materiais) – UENF

---

Prof.<sup>a</sup>: Regina Maria Pinheiro (D. Sc., Eng. e Ciência dos Materiais) – IFF

---

Prof.: Carlos Maurício Fontes Vieira (D. Sc., Eng. e Ciência dos Materiais) – UENF

Orientador

“A vida não é um jogo onde só quem testa seus limites é que leva o prêmio. Não sejamos vítimas ingênuas desta tal competitividade. Se a meta está alta demais, reduza-a. Se você não está de acordo com as regras, demita-se. Invente seu próprio jogo. Faça o que for necessário para ser feliz. Mas não se esqueça que a felicidade é um sentimento simples, você pode encontrá-la e deixá-la ir embora por não perceber sua simplicidade”

Mário Quintana

## AGRADECIMENTOS

Embora a confecção de um trabalho seja uma grande parte de atividades individuais, seria impossível o desenvolvimento e conclusão dessa dissertação sem o companheirismo e apoio de muitas pessoas.

Agradeço:

À Deus, por me dar força e coragem para conseguir chegar até aqui!

À minha mãe, Maria do Carmo Girondi Delaqua, pelo apoio de todas as horas, pelo carinho e amor, e sempre ter uma palavra de conforto em todos os momentos; e meus irmãos, Gleyzis e Reynaldo, e sobrinhas Lavynnia, Anna Laura e Rafaela, por entenderem minha ausência, apesar da saudade. Obrigada, família!

Ao Prof. Carlos Maurício Fontes Vieira, pela orientação, paciência, pelos conselhos, e pela confiança depositada em meu trabalho. Obrigada, professor!

A equipe da Concessionária Águas de Juturnaiba Araruama – ETE Ponte dos Leites, em especial Wemerson, que me deu todo suporte para a coleta do material e informações sobre a estação.

Às Prof.<sup>a</sup> Márcia e Regina, e ao Prof. José Nilson, por terem aceito participar da banca.

Aos amigos, Micaela Nicolite, Juliana Rufino e Lucas Amaral, que fizeram esta caminhada muito mais divertida e alegre. Vocês foram e sempre serão minha família acadêmica.

À minha família, em especial meus primos Isabelle, Katia, Leonardo, e minhas tias Lucileia e Maria das Graças, que sempre me derem força nos momentos mais difíceis.

Às minhas amigas, Amanda Passalini, Gisele Cordeiro, Maria Angélica, Carolina Oliveira, e Dani Awabdi, que me incentivaram a tomar a decisão de encarar mais essa etapa de estudo.

À UENF, pelo apoio e logística.

À Capes, pela concessão da bolsa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, em especial ao Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV) pelo apoio para o desenvolvimento desta pesquisa.

E finalmente, a todos que de alguma forma direta ou indiretamente contribuíram para a concretização deste trabalho.

Obrigada!!!

*Geovana Girondi*

## RESUMO

A contaminação do ecossistema aquático por metais pesados tem sido motivo de preocupação de pesquisadores e órgãos governamentais envolvidos no controle de poluição. Visando minimizar o impacto gerado pelo lançamento desses efluentes em corpos hídricos. Plantas aquáticas tem sido utilizada em pesquisas ecológicas como bioindicadoras da qualidade da água, e devido à rápida reprodução, estas plantas precisam ser retiradas, e quando contaminadas por metais pesados, não podem ser descartadas de forma incorreta, sendo uma alternativa como matéria-prima para a indústria cerâmica. Neste trabalho, objetivou-se o uso de *Salvinia auriculata* como fitorremediadora e a viabilidade do uso de sua biomassa na produção de blocos cerâmicos. Foram preparadas massas argilosas com até 10% de biomassa das plantas de fitorremediação de efluentes e queimadas em temperaturas de 750, 850, 950 e 1050 °C. As propriedades avaliadas foram: densidade aparente a seco, retração linear, absorção de água e resistência à flexão, e análise nas microestruturas das peças. Os resultados obtidos mostraram que é viável a incorporação da biomassa de *S. auriculata* em massas cerâmicas, mas a quantidade deve ser ponderada, para não prejudicar as propriedades da massa. Foi possível analisar que até 2,5% de biomassa pode ser incorporado em cerâmica vermelha, visto que a absorção de água e resistência mecânica situaram-se dentro dos limites normatizados e recomendados, e podem ser indicados como uma alternativa aplicável para destinação de tecidos vegetais após o fitotratamento de efluentes.

## ABSTRACT

*The aquatic ecosystem contamination by heavy metals has been of concern to researchers and government agencies involved in pollution control. In order to minimize the impact caused by the release of the effluents into water bodies. Aquatic plants have been used in ecological research as bio-indicators of water quality, due to their fast reproduction, these plants need to be removed, and when contaminated by heavy metals, they can not be disposable incorrectly, therefore emerge an alternative base for the ceramic industry. Thus, the aim was to use *Salvinia auriculata* as phytoremediation and the viability of using its biomass in the production of ceramic blocks. The ceramic bodies were prepared with up to 10% of plant biomass phytoremediation effluent. The evaluated properties were the following: Dry bulk density, linear retraction, water absorption and flexural strength, microstructure of the parts analyze. The results showed that the *S. auriculata* biomass incorporation in ceramic bodies is feasible, but the amount should be considered, in order to do not harm the mass properties. It was possible to analyze that up to 2.5% biomass can be incorporated into the ceramic body, once the water absorption and mechanical strength were inside the recommended and standardized limits, and they can be indicated as an applicable alternative for vegetal tissue destination, after phytotreating the effluent.*

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	x
LISTA DE TABELAS .....	xii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	4
2.1. Objetivo geral.....	4
2.2. Objetivos específicos .....	4
3. JUSTIFICATIVA.....	5
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	6
4.1. Ambiente aquático .....	6
4.1.1. Técnica de tratamento .....	6
4.1.2. Plantas aquáticas .....	6
4.1.3. Fitorremediação.....	9
4.1.3.1. Fitorremediação do meio aquático.....	11
4.1.3.2. <i>Wetland</i> construídos .....	12
4.1.3.2.1. Estação de Tratamento de Esgoto Ponte dos Leites (ETE) .....	14
4.2. Características das argilas de Campos dos Goytacazes .....	17
4.2.1. Caracterização das matérias-primas .....	21
4.3. Resíduo .....	22
4.3.1. Técnicas de disposição final de resíduos .....	22
4.3.2. Biomassa vegetal .....	23
4.3.3. Disposição final de plantas aquáticas.....	25
4.3.4. Reaproveitamento de resíduos em cerâmica .....	26
4.4. Utilização de biomassa de plantas aquáticas em cerâmica .....	26
5. MATERIAS E MÉTODOS .....	29
5.1. Materiais utilizados .....	30
5.1.1. Macrófita <i>Salvinia auriculata</i> Aublet.....	30
5.1.2. Matérias-primas argilosas.....	31
5.2. Metodologias empregadas.....	32
5.2.1. Beneficiamento das matérias-primas.....	32
5.2.1.1. Coleta das plantas .....	32
5.2.1.2. Beneficiamento das argilas.....	32
5.2.1.2.1. Preparo da massa argilosa .....	32
5.2.2. Formulações das massas cerâmicas.....	33

5.2.3. Processamento dos corpos de prova .....	33
5.2.4. Análise Térmicas termogravimétricas (DSC/TG/DTG) .....	34
5.2.5. Determinações das propriedades .....	34
5.2.5.1. Plasticidade .....	34
5.2.5.2. Densidade aparente a seco .....	35
5.2.5.3. Absorção de água.....	36
5.2.5.4. Retração linear .....	36
5.2.5.5. Tensão de ruptura à flexão .....	37
5.2.6. Análise Microestrutural .....	37
5.2.6.1. Microscopia eletrônica de varredura.....	37
5.2.6.2. Caracterização mineralógica .....	38
5.2.6.2.1. Difração de raios X da peça queimada.....	38
5.2.7. Levantamento econômico.....	38
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	39
6.1. Análise de calorimetria exploratória diferencial (DSC).....	39
6.2. Dilatometria.....	40
6.3. Propriedades das massas cerâmicas .....	41
6.3.1. Plasticidade .....	41
6.3.2. Densidade aparente .....	43
6.4. Propriedades tecnológicas de queima.....	44
6.4.1. Absorção de água.....	44
6.4.2. Retração linear .....	46
6.4.3. Resistência mecânica.....	47
6.4.4. Microscopia eletrônica de varredura.....	49
6.4.5. Caracterização Mineralógica da peça queimada.....	52
6.5. Levantamento econômico .....	53
6.5.1. Balanço econômico para o Forno Garrafão.....	54
7. CONCLUSÕES.....	57
8. SUGESTÕES.....	58
REFERÊNCIAS.....	59

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Grupo de macrófitas aquática. ....	8
Figura 2. Mecanismos utilizado pelas plantas na fitorremediação. ....	10
Figura 3. Fluxograma do processo na ete. Fonte: águas de juturnaíba .....	15
Figura 4. Estação de tratamento de esgoto de araruama, ponte dos leites. ....	15
Figura 5. Lagoa de tratamento com plantas aquáticas onde ocorre a etapa do tratamento secundário. Na imagem a macrófita flutuante <i>S. auriculata</i> . ....	16
Figura 6. Sistema de alagado utilizando macrófitas enraizadas: papyrus (1) e isombrinha chinesa (2).. ....	17
Figura 7. Difratoograma de raios x das argilas de Campos dos Goytacazes.....	19
Figura 8. Difratoograma de raios x das argilas de Campos dos Goytacazes.....	19
Figura 9. Fluxograma das etapas envolvidas na parte experimental. ....	29
Figura 10. Matérias-primas que foram utilizadas nos experimentos, sendo: argila cinza (a); areia (b), argila carolinho (c) e biomassa de <i>S. auriculata</i> (d). ....	30
Figura 11. Imagem da macrófita <i>Salvinia auriculata</i> .....	31
Figura 12. Análise de DSC/TG/DTG da biomassa de <i>S. auriculata</i> . ....	39
Figura 13. Curvas dilatométricas das massas com 0% e 10% de biomassa .....	41
Figura 14. Prognóstico de extrusão por meio dos limites de Atterberg. ....	43
Figura 15. Densidade aparente a seco (a) e de queima (b) das cerâmicas com incorporação de 0%, 2,5%, 5%, 7,5% e 10% de biomassa de <i>S. Auriculata</i> . ....	44
Figura 16. Densidade aparente queima das cerâmicas com incorporação de biomassa de <i>s. Auriculata</i> queimadas nas temperaturas: 750 °C, 850 °C, 950 °C e 1050 °C.....	44
Figura 17. Absorção de água das composições em função da temperatura de queima. ....	45
Figura 18. Absorção de água das composições em função da temperatura de queima. ....	46
Figura 19. Retração linear das peças queimadas em 750 e 850 °C. ....	47

Figura 20. Retração linear das peças queimadas em 950 e 1050 °C. ....	47
Figura 21. Resistência mecânica das peças queimadas em 750 e 850 °C.....	48
Figura 22. Resistência mecânica das peças queimadas a 950 e 1050 °C.....	49
Figura 23. Microscopia eletrônica de varredura da argila 0% resíduo na temperatura de 850 °c com aumento de 100x (a) e 400x (b).....	50
Figura 24. microscopia eletrônica de varredura da argila com 0% de resíduo na temperatura de 1050 °C com aumento de 100x (a) e de 400x (b.) ....	50
Figura 25. Microscopia eletrônica de varredura da argila com 5% de resíduo na temperatura de 850 °C com aumento de 100x (a) e de 400x (b.) ....	51
Figura 26. Microscopia eletrônica de varredura da argila com 5% de resíduo na temperatura de 1050 °C com aumento de 100x (a) e de 400x (b.) ....	51
Figura 27. Drx da peça cerâmica pura queimada a 850 °C.....	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.composição de biomassa seca de macófitas. ....	8
Tabela 2. Valores de nitrogênio, fósforo e carbono encontrado por alguns autores em <i>S. auriculata</i> . ....	9
Tabela 3. Vantagens do processo.....	13
Tabela 4. Eficiência dos sistemas. ....	13
Tabela 5. Outros benefícios da implantação do sistema <i>Wetlands</i> . ....	14
Tabela 8. Composição química das argilas cinza e carolinho. ....	21
Tabela 9. Composição química da areia. ....	22
Tabela 7. As principais vantagens do emprego da biomassa vegetal.....	24
Tabela 10. Matérias-primas e porcentagens utilizadas para o preparo da massa. ...	33
Tabela 11. Composições utilizadas para o preparo dos corpos de prova. ....	33
Tabela 12. Limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade das massas cerâmicas com proporções de 0, 5 e 10 % de biomassa de <i>S. auriculata</i> . ....	42
Tabela 13 – dados para cálculo de balanço econômico durante a queima de produtos cerâmicos. ....	54
Tabela 14– resumos dos resultados de economia energética por tipo de forno durante a etapa de queima de cerâmica com a incorporação de biomassa.....	56

## 1. INTRODUÇÃO

Desde o surgimento da civilização humana, o homem modifica o meio ambiente, e nas últimas décadas isso ocorre de maneira mais intensificada. A industrialização, mesmo sendo acompanhada do progresso e do desenvolvimento, traz um acentuado dano ambiental, através do lançamento de efluentes líquidos em ambientes aquáticos (VERMA *et al.*, 2008). Segundo Tavares (2013), uma das atividades com alto potencial de degradação ambiental é a industrial, que muitas vezes gera efluentes tóxicos e quase sempre com alta capacidade poluidora.

A descarga de efluentes líquidos em corpos hídricos pode causar variações nas características físico-químicas, tais como, pH, temperatura, composição, e concentração de cada um dos componentes químicos, como nutrientes e metais pesados, trazendo drásticas consequências para os seres vivos que dependem direta ou indiretamente do corpo de água (BRAGA *et al.*, 2002). Apesar de serem essenciais para inúmeros processos metabólicos aos organismos, os metais pesados são potencialmente perigosos quando em excesso (DOMINGOS *et al.*, 2005).

Devido a elevada contaminação dos corpos hídricos, no Brasil foi criada uma legislação ambiental, para evitar sua contaminação (CALFA & TOREM, 2007). A Resolução CONAMA 357/2005, contém normas para o controle de despejo de efluentes, onde são determinadas as concentrações máximas dos efluentes industriais.

A contaminação dos corpos hídricos por metais pesados tem sido objeto de grande interesse, devido a incapacidade de suportar a alta poluição provocada pela atividade antrópica elevada, principalmente em países mais industrializados (ALVAREZ *et al.*, 2002; SOUZA *et al.*, 2002). A fitorremediação dessas áreas poluídas é uma alternativa bastante útil para descontaminação do meio, dada pela utilização de plantas específicas (ARAÚJO, 2000).

A utilização de macrófitas aquáticas no tratamento de águas residuais além de representarem baixo custo, diminuem significativamente parâmetros como Demanda Biológica de Oxigênio (DBO), pois os resíduos orgânicos são absorvidos por suas raízes como nutriente (NAIME & GARCIA, 2005). Estas plantas são capazes de acumular nos seus tecidos elevadas concentrações de metais como de cobalto (Co), cobre (Cu), Cd (cádmio), cromo (Cr), chumbo (Pb), níquel (Ni), zinco (Zn), ferro (Fe) e manganês (Mn) (BAKER & BROOKS, 1989; XING *et al.*, 2013; WANG *et al.*, 2014).

A eficiência na remoção biológica dos poluentes orgânicos e inorgânicos está intimamente ligada ao manejo que é feito com a biomassa no sistema de tratamento. Isto ocorre, pois, as altas concentrações de fósforo e nitrogênio proporcionam estímulo ao crescimento da biomassa praticamente durante todo o ano (COSTA, 2004; MISHIMA *et al.*, 2007).

As macrófitas são utilizadas em pesquisas ecológicas como bioindicadores da qualidade de água, devido sua capacidade de absorver substâncias inorgânicas do corpo d'água (LEWS, 1993). Entre esses potenciais bioindicadores destaca-se a *Salvinia auriculata*, pela facilidade de manipulação experimental e por se encontrar disseminada em todo o país. Esta planta tem sido utilizada em estudos de tolerância ao Cd e como indicadora biológica da presença e dos níveis de metais pesados no corpo d'água (OUTRIDGE & HUTCHINSON, 1990).

A fitorremediação além de apresentar vantagem econômica e ambiental, no Brasil, devido as condições climáticas e ambientais esta técnica é muito utilizada em grande parte do território nacional (BARKO, 1991). As macrófitas contaminadas geralmente são dispostas de forma inadequada no meio, provocando impacto negativo, ou encaminhadas para aterro sanitário (Resolução CONAMA 308/2002). Aterros, embora não apresentem uma concepção ambiental correta, não resolvem a questão, sendo a opção menos favorável na pirâmide de priorização do gerenciamento de resíduos sólidos (Lei 12.305/2010). Portanto, sua reutilização como matéria prima é uma alternativa interessante para as indústrias.

O mercado da reciclagem vem crescendo, pois praticamente todo tipo de processo gera resíduo, conseqüentemente novas estratégias de tratamento, incorporação e inertização são necessárias (BALATON *et al.*, 2002). Por isso, a utilização de biomassa seca de macrófita vem sendo estudada na produção de blocos cerâmicos, viabilizando economia de material e energia (ALBUQUERQUE, 2010).

A incorporação de resíduos de atividades industriais em produtos cerâmicos é uma alternativa para reduzir impactos ambientais, como destruição da paisagem, fauna e flora causada por sua disposição indiscriminada. Também consistem numa forma de reciclagem de matérias atendendo exigências de órgão ambientais (VIEIRA *et al.*, 2007). Como as massas utilizadas na indústria cerâmica tradicional são de natureza heterogênea, a presença de materiais residuais de vários tipos é permitida, mesmo em porcentagens significantes (OLIVEIRA *et al.*, 2004). O setor de construção civil é excelente para incorporar resíduos, pois pode aceitar grandes quantidades de

materiais, sendo a técnica de encapsulamento de resíduos uma das mais promissoras (OLIVEIRA *et al.*, 2006).

Segundo Bonet (2002), uma das questões de fundamental importância para a sociedade é a necessidade de reaproveitar resíduos, como forma de recuperar matéria e energia, preservando recursos naturais, oferecendo uma menor degradação ambiental e proporcionando melhorias nas condições de vida das comunidades, e Saidelles *et al.* (2012), afirma que uma das formas de minimizar os impactos é a preservação dos recursos naturais ou a reutilização de resíduos.

Desta forma, este trabalho avalia os efeitos da incorporação de até 10% em massa de biomassa utilizada em fitorremediação de efluentes líquidos nas propriedades tecnológicas de cerâmica vermelha. Neste trabalho, é apresentado ainda um levantamento econômico preliminar abordando a eventual economia energética durante a etapa de queima da massa cerâmica vermelha incorporada à biomassa.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo geral**

Investigar a incorporação da macrófita aquática *Salvinia auriculata* Aubl., utilizada em fitorremediação de efluentes líquidos, em cerâmica vermelha.

### **2.2. Objetivos específicos**

1. Avaliar o efeito da incorporação de até 10% em massa de biomassa na plasticidade, bem como nas propriedades físicas e mecânicas, da cerâmica, tais como: densidade relativa a seco, retração linear de queima, absorção de água e tensão de ruptura à flexão;
2. Avaliar a eventual economia de energia durante a queima cerâmica incorporada com biomassa.

### 3. JUSTIFICATIVA

A fitorremediação por macrófitas aquáticas, em especial para a remoção de metais pesados de águas residuárias, é uma técnica que vem sendo estudada e que tem mostrado resultados bastante satisfatórios. Este processo gera, entretanto, grande quantidade de biomassa devido à rápida reprodução e desenvolvimento das plantas utilizadas no tratamento. Tal resíduo contaminado por metais pesados, bioacumulativos e tóxicos, não pode ser descartado no meio ou reaproveitado para a produção de ração animal e adubo. Por isso, a necessidade de desenvolver técnicas inovadoras para destinação correta e sustentável desse produto.

Sendo as massas cerâmicas heterogêneas, geralmente, constituídas de uma mistura de materiais plásticos e não plásticos, com uma larga variabilidade química e mineralógica, elas suportam a incorporação de resíduos industriais e urbanos sem grandes variações de suas propriedades, se adicionadas em quantidades adequadas. Logo, após o emprego das macrófitas para fitorremediação de ambientes contaminados com metal é interessante sua incorporação no material cerâmico. Isto pode apresentar uma economia para a produção do material e um ganho para o meio ambiente.

## **4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **4.1. Ambiente aquático**

Os ambientes aquáticos compreendem uma grande diversidade de ecossistemas (lagos, rios, estuário e oceanos), e por serem abertos e dinâmicos, sofrem modificações contínuas em sua composição química (COSTA *et al.*, 2008), sendo ações antropogênicas um dos principais fatores para alterações das características dos ecossistemas (LIU *et al.*, 2011; 2010).

O lançamento de efluentes domésticas, agrícolas e industriais, sem tratamento adequado em rios e lagos pode provocar problemas como a eutrofização do ambiente. Segundo Costa (2008), a urbanização é uma das grandes responsáveis por vários tipos de alterações nos ecossistemas. A poluição das águas continentais é reflexo do crescimento industriais e econômico, juntamente ao descuido e falta de preparo das empresas, governo e a própria população.

#### **4.1.1. Técnica de tratamento**

Devido à grande quantidade de problemas ambientais, muito tem se pesquisado por alternativas para despoluir áreas contaminadas. Esta busca fez com que o homem procurasse identificar técnicas que apresentem eficiência na descontaminação, simples execução, baixo custo e menor tempo no processo (PIRES *et al.*, 2003). A fitorremediação condiz com o que foi descrito por Pires *et al.* (2003), pois a técnica de é uma opção que apresenta baixo custo e pode ser utilizada em grandes áreas, com a possibilidade de remediar águas contaminadas e solo (DINARDI *et al.*, 2003).

#### **4.1.2. Plantas aquáticas**

As macrófitas compõem os vegetais aquáticos que ainda apresentam características de vegetais terrestres, como a presença de cutícula, aumento dos tecidos responsáveis pela captura de gases e o aumento da capacidade de transpiração (CLEMENS, 2001; POMPÊO & MOSQUINI-CARLOS, 2003). Para Pott e Pott (2000), as macrófitas podem ser consideradas plantas que vivem na água, sobre a água, ou na margem, com relação direta com água em abundância. Para Pompêo (2001), a readaptação ao ambiente aquático causou modificações em diferentes

níveis, que proporcionaram ou facilitaram o regresso destes vegetais ao meio aquático, como: a diminuição dos tecidos de sustentação; redução dos estômatos (ausentes ou não funcionais); cloroplastos posicionados na parte superior das folhas; e folhas com cutículas finas para promover a troca de gases com o meio líquido.

Devido ao fato das macrófitas aquáticas constituírem um grupo muito grande, elas são geralmente classificadas em 5 grupos ecológicos, baseados em seu modo de vida (biotipo) no ambiente aquático. Assim, pelo grau de adaptação ao meio aquático, elas são classificadas em: (ESTEVES, 1998).

- Macrófitas aquáticas emersas: plantas enraizadas no sedimento com as folhas acima da água. Por exemplo: *Typha* sp., *Pontederia* sp. E *Eleocharis* sp.
- Macrófitas aquáticas com folhas flutuantes: plantas enraizadas no sedimento e com folhas flutuando na lâmina d'água. Por exemplo: *Nymphaea* sp., *Victoria* sp. e *Nymphoides* sp.;
- Macrófitas aquáticas submersas enraizadas: plantas enraizadas no sedimento, que crescem submersa. Por exemplo: *Elodea* sp. e *Egeria* sp.;
- Macrófitas aquáticas submersas livres: plantas que apresentam raízes pouco desenvolvidas, flutuando submersas em águas com pouca turbulência. Por exemplo: *Utricularia* sp. e *Ceratophyllum* sp.;
- Macrófitas aquáticas flutuantes: as plantas flutuam na superfície da água. Por exemplo: *Eichornia* sp., *Pistia* sp. e *Salvinia* sp.

Esses grupos ecológicos podem estar distribuídos de forma organizada e paralela. Deste modo, forma-se um gradiente de distribuição da margem para o interior: iniciando com as macrófitas emersas, passando pelas de folhas flutuantes até as submersas enraizadas. Na Figura 1 é possível observar a distribuição das macrófitas.

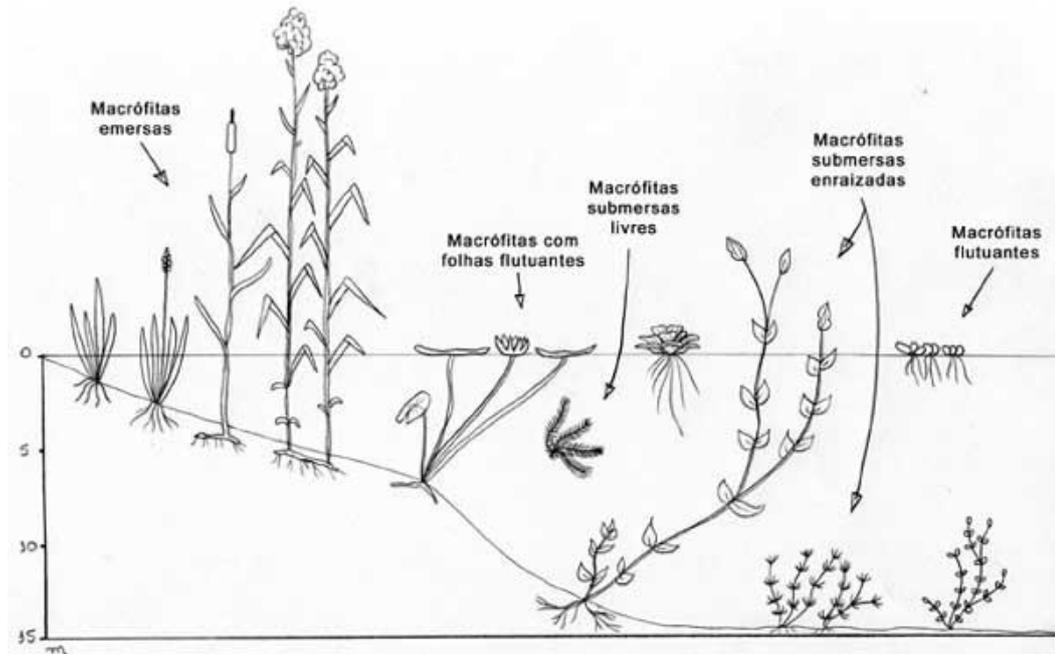


Figura 1. Grupo de macrófitas aquática.  
Fonte: Esteves, 1998.

A separação das plantas em grupos ecológicos é para facilitar a identificação dos fatores limitantes e os tipos de habitats que são colonizáveis por cada espécie.

Por estarem distribuídos em vários grupos ecológicos (Figura 1), e pela ampla diversidade vegetal, a composição química das macrófitas é bem variada, já que para cada método de sobrevivência, é necessária uma estrutura específica para sustentação (BIANCHINI JR.; CUNHA-SANTINO, 2008). Joyce (1993 *apud* BIANCHINI JR.; CUNHA-SANTINO, 2008), reuniu dados onde foi possível calcular o quanto as plantas continham em sua composição. Na Tabela 1 são apresentados os valores, onde é possível compara com resultados obtidos por Bianchini Jr. e Cunha-Santino (2008).

Tabela 1. Composição de biomassa seca de macófitas. Modificada.

Cinzas (%)	N (%)	F (%)	C (%)	Autor
14%	2,26%	0,25%	41%	Joyce (1993)
	1,9%	0,26%	39%	Bianchini Jr. e Cunha-Santino, 2008

Na Tabela 2 são apresentados valores para carbono, nitrogênio e fósforo em biomassa de *S. auriculata* encontrados por outros autores, e segundo Bianchini Jr. e

Cunha-Santino (2008), a variação na composição se dá devido às condições ambientais de cada planta.

Tabela 2. Valores de Nitrogênio, Fósforo e Carbono encontrado por alguns autores em *S. auriculata*. Modificada

Macrófita	N (%)	F (%)	C (%)	Autor
<i>Salvinia auriculata</i>	0,84%	0,21%	26,37%	Willian, 1956.
<i>Salvinia auriculata</i>	-	-	40,08%	Peret & Bianchini Jr. 2004
<i>Salvinia auriculata</i>	-	-	32,82%	Cunha-Santino & Bianchini Jr. 2006b

Segundo Corrêa *et al.* (2003), o conhecimento sobre a relação C/N é muito importante, principalmente pelo fato de que o processo de decomposição da biomassa é acelerado, indicando que esta biomassa descartada terá uma rápida degradação.

#### 4.1.3. Fitorremediação

Na técnica da fitorremediação plantas são utilizadas afim de remover poluentes presentes no meio, absorvendo e, ou transformando em seus tecidos, sendo assim, apontada como uma alternativa para reduzir os impactos provenientes da utilização de metais (ALMEIDA *et al.*, 2007). O conceito de se utilizar plantas para se limpar ambientes contaminados não é novo. Na Alemanha, há muitos anos plantas foram utilizadas para o tratamento de águas residuárias (ACCIOLY e SIQUEIRA, 2000). Atualmente, o uso desta tecnologia em países desenvolvidos, como os Estados Unidos, Canadá e Alemanha vem se expandindo cada vez mais, por sua grande viabilidade técnica e econômica (SUCHKOVA *et al.*, 2010, CUNNINGHAM *et al.*, 1996).

A fitorremediação de áreas poluídas é muito útil para o meio ambiente, devido a utilização de plantas específicas para despoluir áreas contaminadas deixando os níveis seguros e compatíveis com a proteção à saúde humana e evitando a disseminação de substâncias nocivas ao ambiente (DINARDI *et al.*, 2003). Para que isso seja possível, é necessário a utilização de plantas que possuam como características como: boa capacidade de absorção, raízes profundas, elevada taxa de crescimento, e sejam resistentes a poluentes (COUTINHO & MARBOSA, 2007;

ANDRADE *et al.*, 2013). Dependendo do tipo de contaminante, a planta pode utilizar diferentes mecanismos para sua remoção. Na Figura 2 estão representadas em qual parte da planta o mecanismo é eficiente.

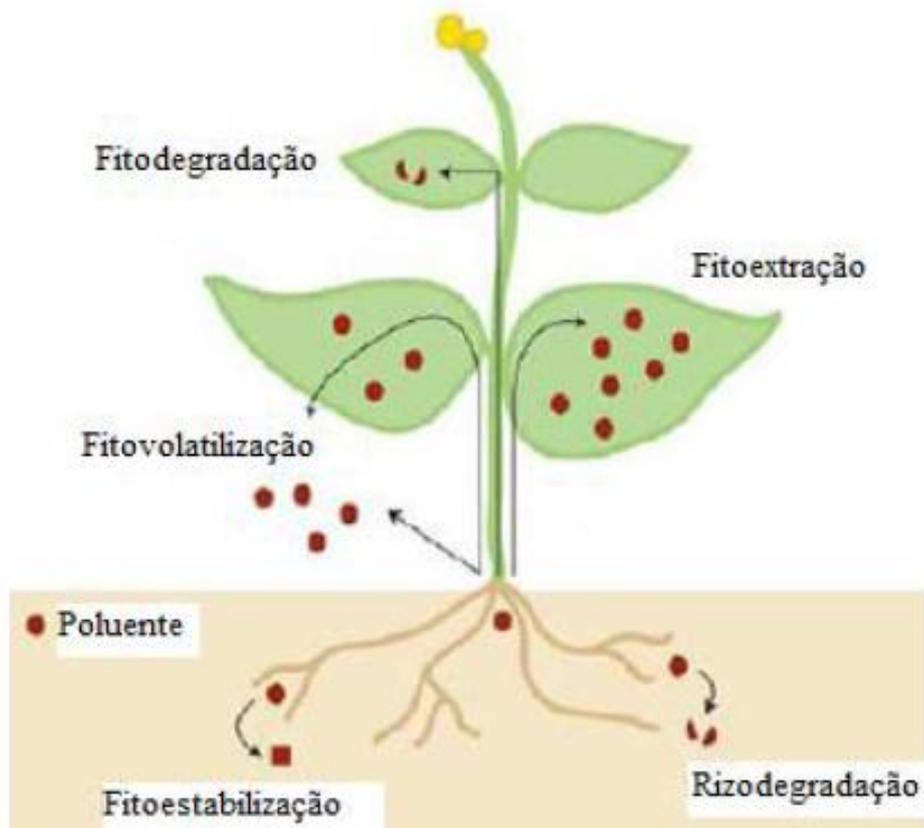


Figura 2. Mecanismos utilizado pelas plantas na fitorremediação.  
Fonte: Martins (2014)

No Quadro 1 são apresentados os mecanismos de fixação utilizados, o processo e quais os contaminantes são fixados pelas plantas.

Quadro 1. Tecnologias e processos de fitorremediação.  
 Fonte: Andrade *et al.* (2013) - (Modificado)

<b>Mecanismos</b>	<b>Meta do processo</b>	<b>Contaminante</b>
<b>Fitoextração</b>	As plantas absorvem os contaminantes pelas raízes, onde são armazenadas ou transportadas, e acumuladas nas partes aéreas. Esta técnica é muito utilizada devido à alta eficiência e baixo custo;	Ag, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn.
<b>Fitovolatilização</b>	As plantas transformam o poluente em uma forma volátil, eliminando para a atmosfera por meio do tecido das folhas;	Solventes clorados, alguns inorgânicos (Se, Hg e As)
<b>Fitodegradação</b>	Os poluentes são degradados e transformados pela planta em moléculas mais simples;	Compostos orgânicos, solventes clorados, fenóis, herbicidas
<b>Fitoestabilização</b>	Os poluentes são estabilizados evitando então a exposição dos mesmos através da erosão e lixiviação, reduzindo o risco para a saúde humana e para o ambiente;	As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn
<b>Rizodegradação</b>	O contaminante é degradado na região rizosférica pela ação de fungos e bactérias, a fim de proporcionar condições ideais para o crescimento e desenvolvimento de fungos e bactérias que irão atuar no processo de degradação dos contaminantes orgânicos;	Compostos orgânicos, pesticidas, solventes clorados.
<b>Rizofiltração</b>	Este processo é aplicado para a remediação de ambientes aquáticos. Nele, as plantas absorvem e concentram os metais em suas raízes e folhas, sendo possível recuperar ambientes poluídos por diversos tipos de substâncias.	Metais (Pb, Zn, Cu, Ni, Hg, Se), compostos orgânicos, elementos radioativos, entre outros.

#### 4.1.3.1. Fitorremediação do meio aquático

A fitorremediação além de apresentar vantagem econômica e ambiental, no Brasil, devido as condições climáticas é muito utilizada em grande parte do território nacional (BARKO, 1991). As macrófitas são utilizadas em pesquisas ecológicas como bioindicadores da qualidade de água devido sua capacidade de absorver as

substâncias inorgânicas do corpo d'água, mostrando-se muito eficientes também na remoção de sólidos em suspensão, nutrientes e substâncias orgânicas tóxicas (LEWIS, 1995).

Para Martelo e Borrero (2012), o uso de macrófitas flutuantes tem demonstrado uma eficiência significativamente alta na remoção de todos os constituintes das águas residuais, onde foram testadas nos sistemas de tratamento. No Brasil, as macrófitas aquáticas flutuantes mais estudadas são o aguapé (*Eichornia crassipes*), a alface ou repolho da água (*Pistia stratiotes*) e a *Salvinia* (*Salvinia molesta*). Segundo Thomaz (2002), estas espécies são nativas e as mais citadas por apresentarem crescimento excessivo em reservatórios. Entre as macrófitas aquáticas com potencial bioindicador destaca-se a *Salvinia auriculata*, pela facilidade de manipulação experimental e por se encontrar disseminada em todo o país.

#### **4.1.3.2. Wetland construídos**

O termo *Wetland* é utilizado para designar vários ecossistemas naturais que ficam parcialmente ou totalmente alagados durante o ano, e compõem diversos ecossistemas, apresentando condições favoráveis para o crescimento de macrófitas (CAMPOS *et al.*, 2002). Os *Wetlands* construídos, que no Brasil recebe também outras definições (áreas alagadas construídas ou tratamento por zona de raízes), são ecossistemas artificiais que imitam de forma controlada os princípios básicos de modificação da qualidade da água dos *Wetlands* naturais (CAMPOS *et al.*, 2002).

Os sistemas *Wetlands*, no Brasil, tem sido muito utilizado há pelo menos 30 anos, e tem como finalidade a melhoria da qualidade das águas (VYMAZAL *et al.*, 2008). O sistema de tratamento de esgoto através de alagados vem se tornando cada vez mais importante, e segundo Shutes *et al.* (2001), o sistema apresenta sucesso no tratamento de vários tipos de águas residuais e podem ser uma alternativa de grande importância no tratamento de águas poluídas, pois utilizam processos naturais. Para Salati (2011) e Salati Jr. *et al.* (1999), quando aplicados no sistema de tratamento de efluentes, o sistema pode ser utilizado como uma alternativa secundária e terciária, realizando a remoção de nutrientes e reduzindo taxa de DQO e DBO do efluente.

A simplicidade da operação e manutenção faz com que seja considerada a mais promissora tecnologia para aplicação em tratamento de esgoto em países em desenvolvimento (HARBEL, 1999). Segundo Salati (2009) em diversos países tem se

utilizado o sistema *Wetlands* para o tratamento de recursos hídricos, e no Brasil, o clima tropical é muito favorável para um excelente desempenho do processo (BUENO, *et al.*, 2013).

Segundo Salati (2009), para a implantação do sistema é muito simples. Na Tabela 3 estão apresentadas as principais vantagens.

Tabela 3. Vantagens do Processo.

Baixo custo para ser implantado

Eficiência no processo de recuperação de recursos hídricos;

Fácil operação e manutenção;

Elevada produção de biomassa. A mesma pode ser utilizada na produção de ração, energia e biofertilizantes.

Segundo o mesmo autor, o processo é simples, mas a eficácia dos sistemas de alagados, se dá graças a eficiência das plantas e associações, que são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Eficiência dos sistemas.

Adsorção de partículas pelas raízes;

As plantas absorvem nutrientes e metais;

Microrganismos associados à rizosfera;

Transporte de oxigênio.

Na Tabela 5 são abordados outros itens, pois segundo Sezerino (2006), além das vantagens citadas por Salati (2009), outros benefícios que dever ser mencionados.

Tabela 5. Outros benefícios da implantação do sistema *Wetlands*.

---

Não há necessidade de aditivos químicos;

Há a possibilidade de reuso do efluente tratado, devido a sustentabilidade do sistema;

Além de beleza e harmonização com o ambiente em que é inserido.

---

De acordo com a literatura, no Brasil, a primeira tentativa de utilização de *Wetlands* para a despoluição de água, foi testada por Salati e Rodrigues (1982). Para o teste, foi construído um lago artificial ao lado de um rio excessivamente poluído. Segundo o autor, os resultados se mostraram muito satisfatório, o que levaram a novos experimentos, afim de se testar novas tecnologias onde pudesse aumentar a eficiência do tratamento, e baixo custo de operação.

No Brasil, a primeira estação de tratamento de esgoto a adotar o sistema *Wetland* foi a ETE Ponte dos Leites, em de Araruama – RJ, onde mais de 90 % do esgoto gerado na cidade é tratado pelo sistema. A estação é também a maior ETE da América Latina.

#### 4.1.3.2.1. Estação de Tratamento de Esgoto Ponte dos Leites (ETE)

Neste item será abordado a forma de funcionamento da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE). As informações aqui contidas foram fornecidas por representantes da concessionária Águas de Juturnaíba à autora.

A Estação de Tratamento de Esgoto Ponte dos Leites (ETE) está localizada no município de Araruama, no Rio de Janeiro, RJ, (22°52'43.43"S e 42°21'57.01"O). A ETE Ponte dos ETE Leites, foi inaugurada em 2005, sendo a primeira no Brasil e maior da América Latina a adotar o sistema *Wetland*. Em 2009 foi ampliada, tanto na capacidade, quanto no nível do tratamento, com a capacidade de tratamento de 200 litros de esgoto por segundo, em uma área de 6,8 hectares. A ETE foi remodelada de forma que pudesse atender o aumento da demanda local, sendo então implantado o sistema com remoção de nutrientes através do sistema de *Wetland*, que é feito com plantas aquáticas. Na Figuras 3 é apresentado um fluxograma com as etapas do funcionamento de uma ETE, e na Figura 4 é apresentada uma imagem da estação, onde ocorre cada etapa do tratamento.

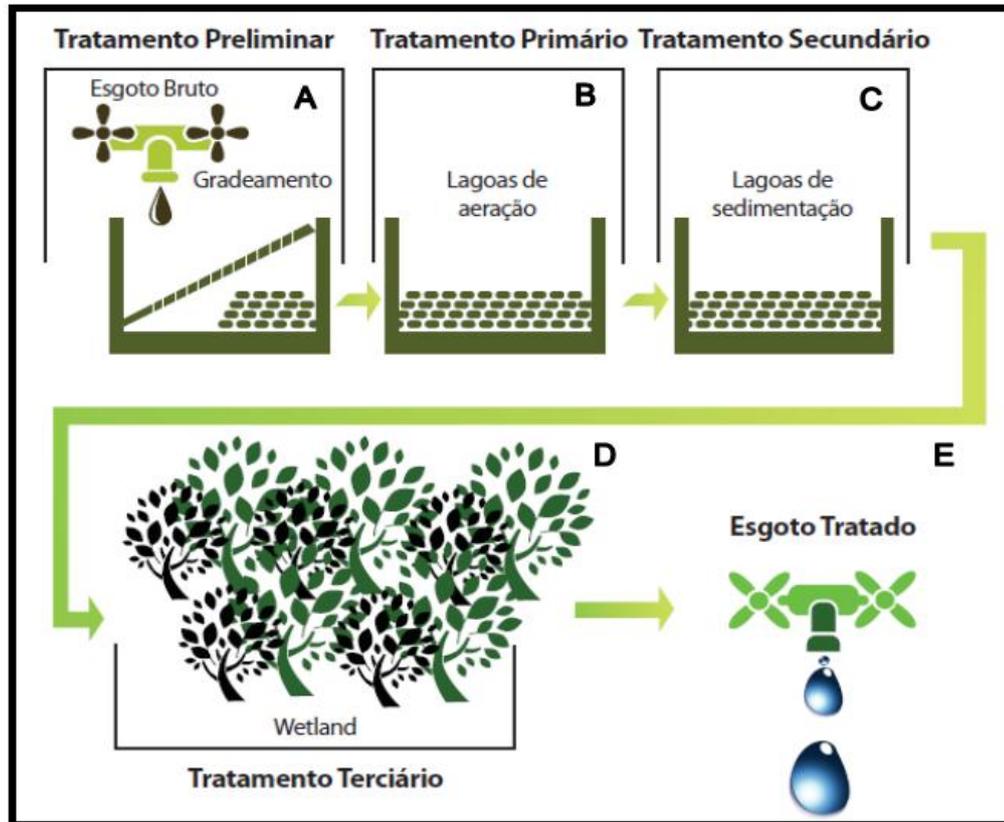


Figura 3. Fluxograma do processo na ETE. Fonte: Águas de Juturnaíba

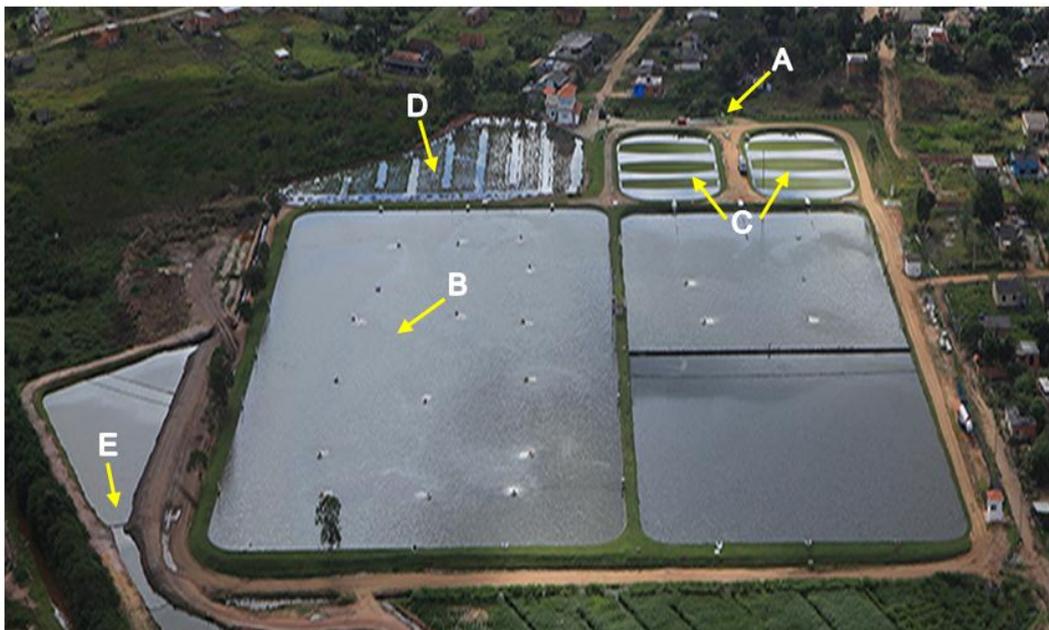


Figura 4. Estação de tratamento de esgoto de Araruama, Ponte dos Leites. As etapas do tratamento estão identificadas pelas letras, sendo: Tratamento preliminar (A), tratamento primário (B), tratamento secundário (C), tratamento terciário (D), e esgoto tratado (E).

Fonte: Águas de Juturnaíba.

Estas lagoas possuem aeradores de superfície, e possuem no máximo 2 m de profundidade, onde o oxigênio dissolvido na água fornece às bactérias energia suficiente para degradação da matéria orgânica. Ao passarem pelas lagoas de aeração, os efluentes seguem para as lagoas de sedimentação. Estas lagoas são profundas, com aproximadamente 4 a 5 m de profundidade, e não têm agitação. Nelas, o processo de remoção de nutrientes (fósforo e nitrogênio) é realizado por plantas aquáticas de superfície, que dão início o processo de remoção de nutrientes essenciais para a sobrevivência de algas e plantas. Na Figura 5 é possível observar a etapa do tratamento, onde as plantas são distribuídas em raias para facilitar a retirada.



Figura 5. Lagoa de tratamento com plantas aquáticas onde ocorre a etapa do tratamento secundário. Na imagem a macrófita flutuante *S. airiculata*. Foto: acervo da autora (com a devida autorização).

Na Figura 6 é possível observar a fase final do tratamento, onde são removidos o excesso de nutrientes, e para isto, ocorre o processo de irrigação, inundação e infiltração em leitos cultivados, através do processo *Wetland* de tratamento. O efluente final é um líquido transparente, quase inodoro, e com características que permitem que ele seja lançado diretamente aos corpos receptores.



Figura 6. Sistema de alagado utilizando macrófitas enraizadas: Papyrus (1) e Sombrinha Chinesa (2). Foto: acervo da autora (com a devida autorização).

O sucesso do sistema *Wetland* vai além dos baixos custos energéticos, oferece muitas possibilidades de reciclagem da biomassa produzida, que pode virar fertilizante, ração animal, gerar energia, etc. No processo de tratamento de esgoto, a ETE gera cerca de 580 toneladas de lixo por mês. A empresa através do programa “resíduo zero”, pretende gerar cerca de 200 toneladas de adubo orgânico por mês, produtos artesanais, além da implantação de um biodigestor para a produção de energia para consumo próprio.

#### **4.2. Características das argilas de Campos dos Goytacazes**

O município de Campos dos Goytacazes está localizado no norte do estado do Rio de Janeiro, com cerca de 483 970 habitantes em uma área de aproximadamente 4.827 Km<sup>2</sup> (IBGE, 2015). O município consiste em uma planície formada sobre uma antiga baía, sobre a qual Rio Paraíba discorreu em épocas geológicas, e após a regressão, originou então diversas formações em suas margens, apresentando abundância de materiais argilosos, devido ao transporte de sedimentos quaternário carregado (LAMEGO, 1974), fazendo do setor ceramista responsável por cerca de 35%

da produção estadual de cerâmica vermelha, de m total de 150 milhões de peças por mês (VIEIRA, 2001).

Devido ao vasto depósito de argilas sedimentares, o município de Campos dos Goytacazes é considerado um dos maiores produtores de cerâmica vermelha do estado, possuindo cerca de 120 indústrias cerâmicas, representando um total de 40% da produção do estado (VIEIRA *et al.*, 2000), gerando cerca de 6.000 trabalhadores diretos (Sindicato da indústria cerâmica de Campos).

As argilas utilizadas na produção de cerâmica estão localizadas na margem direita do Rio Paraíba, local onde também estão instaladas as indústrias cerâmicas (RAMOS, 2000). Os sedimentos da região são de origem quaternárias, e são dos tipos marinhos e fluviolacustre. Devido a estas características, as matérias-primas argilosas campistas, apresentam grande heterogeneidade, com granulometria fina aliada à alta plasticidade, o que as tornam ideais à produção cerâmica

As argilas são de grande diversidade, sendo originadas pela formação de depósitos diferentes. Algumas argilas são denominadas de acordo com a cor apresentada na jazida, como, argila amarela, argila amarela-acinzentada, argila cinza e argila preta (MONTEIRO; VIEIRA, 2002), recebendo ainda a classificação como argilas “fortes” e “fracas”, referindo-se à propriedade plástica da argila. As argilas “fortes”, são consideradas mais plásticas, e a “fraca”, menos plásticas. A plasticidade da massa está associada a quantidade de argilominerais presentes, quando maior o teor, mais plástica será a massa (NORTON, 1973.)

As massas cerâmicas locais são geralmente elaboradas pela indústria através da mistura das argilas fortes e fracas, algumas cerâmicas ainda utilizam ainda areia do tipo quartzosa à composição. A composição desta mistura é bastante variável e depende do tipo de argila utilizada, do tipo de produto que se deseja fabricar e das próprias características das argilas (PINHEIRO; VIEIRA, 2011).

As argilas campistas apresentam como mineral argiloso predominante a caulinita (ALEXANDRE, 2000), porém é comum ainda a presença de minerais como, quartzo, mica, goetita, gbsita, rutilo, ilita e montmorilonita (MONTEIRO; VIEIRA, 2002). Segundo Alexandre (2000), mesmo estas argilas apresentando grande diversidade, apresentam certa homogeneidade mineralógica, possivelmente devido ao fato de serem originárias de depósitos com mesma origem sedimentar, além de formação geológica recente.

Monteiro *et al.* (2004), e Monteiro e Vieira (2002), analisaram algumas argilas da região, utilizando a técnica de difração de raio X. Nas Figuras 7 e 8 estão apresentados os resultados, onde é possível observar a predominância do argilomineral caulinita.

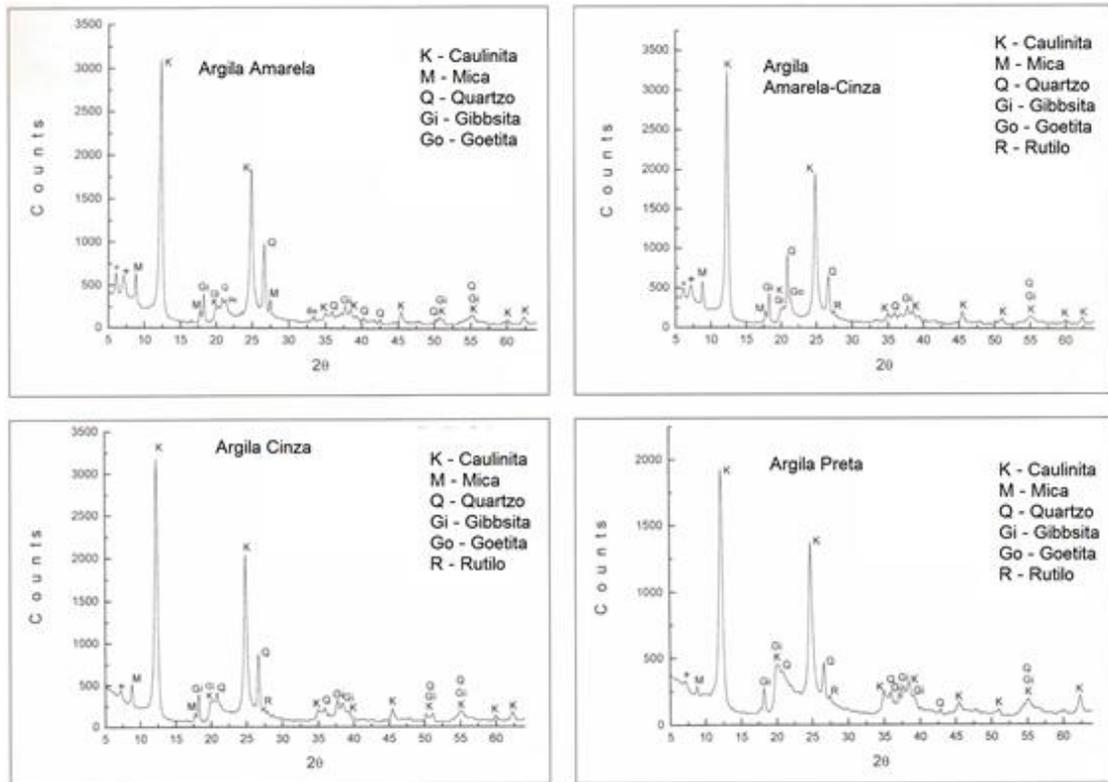


Figura 7. Difratoograma de raios X das argilas de Campos dos Goytacazes. Fonte: Monteiro e Vieira (2002).

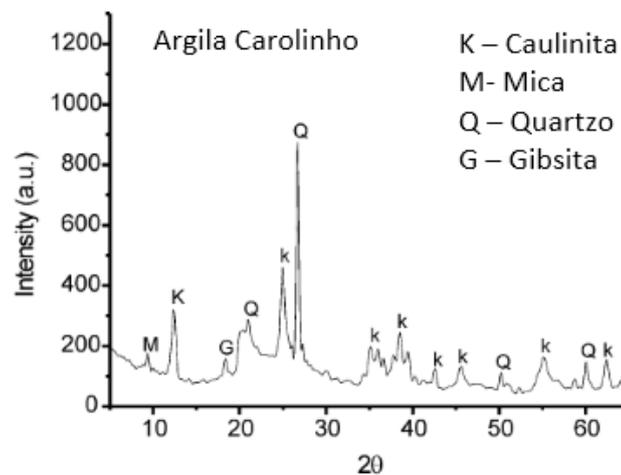


Figura 8. Difratoograma de raios X das argilas de Campos dos Goytacazes. Fonte: Monteiro et al (2004) – (Modificado).

As argilas de Campos também são semelhantes quanto à composição química, onde tem como óxido predominante o  $\text{SiO}_2$ , e o óxido de alumínio como o segundo óxido mais encontrado. Os óxidos de silício podem também estar presentes na forma de quartzo, enquanto o óxido de alumínio como constituinte da gibbsita, revelando alto percentual de argilominerais e baixo teor de quartzo livre. O alto percentual de alumina, tende a aumentar a refratariedade das argilas de Campos e a presença de gibbsita contribui para o aumento da perda ao fogo e refratariedade do material, necessitando então mais energia no momento da queima (VIEIRA; MONTEIRO, 2002; VIEIRA *et al.*, 2001).

As argilas de Campos também são bem similares quanto ao limite de plasticidade (LP). O método determina o intervalo de umidade em que uma argila ou massa argilosa possa ser moldável. Um valor de grande interesse tecnológico é o limite de plasticidade (LP), já que esse valor representa a quantidade de água mínima necessária para que a massa argilosa alcance a consistência plástica, possibilitando então a conformação da peça. O limite de liquidez (LL) está associado à quantidade de água em que o material apresenta uma consistência de lama, excedendo, então, a faixa de consistência plástica. Já o índice de plasticidade (IP) é a diferença entre LL e LP, indicando a faixa de consistência plástica (MARSIGLI; DONDI, 1997).

Uma argila altamente plástica acarreta em peças com maior dificuldade de secagem, baixa permeabilidade, e retrações de secagem e queima excessivas. Fatores estes que podem ocasionar o aparecimento de graves defeitos na peça. Argilas que apresentem o IP inferiores a 10% não são adequadas para a produção de produtos cerâmicos, devido ao risco de problemas durante a extrusão (VIEIRA *et al.*, 2008; MONTEIRO *et al.*, 2004).

Segundo Vieira (2001), as matérias-primas da região apresentam elevado percentual de partículas de tamanho inferior a  $2 \mu\text{m}$ , além de baixo percentual superior a  $63 \mu\text{m}$ . Segundo Abajo (2000) e Santos (1989), quanto maior o percentual da “fração argila”, maior a plasticidade. Isso se dá porque os argilominerais se associam aos intervalos de tamanho de partículas.

Devido as características já mencionadas, para o preparo de uma massa cerâmicas, geralmente são elaboradas formulações através da mistura das argilas “fortes” e “fracas”. Algumas cerâmicas utilizam ainda areia à composição. A composição desta mistura é bastante variável e depende do tipo de argila utilizada,

do tipo de produto que se deseja fabricar e das próprias características das argilas (VIEIRA *et al.*, 2000).

#### 4.2.1. Caracterização das matérias-primas

As matérias-primas argilosas e da areia utilizadas neste trabalho já foram caracterizadas e discutidas em trabalhos anteriores. Portanto, este item aborda a composição química das matérias-primas.

As matérias-primas argilosas utilizadas foram: argilas barro forte ou cinza, argila carolinho e areia, ambos do município de Campos dos Goytacazes, RJ. Segundo Vieira *et al.* (2008) e Monteiro *et al.* (2004), ambas as argilas são predominantemente caulínica, tendo ainda a presença de quartzo, o que é uma característica das argilas da região, sendo encontrado ainda a presença de gibsita e mica. Segundo Vieira *et al.* (2003), a presença da gibsita é capaz de aumentar a perda ao fogo e a refratariedade das peças, e Vieira *et al.* (2008), relata que a presença de mica pode ocasionar defeitos na peça, mas apresentando tamanho de partículas diminuídas, pode atuar como fundente, devido à presença de óxidos alcalinos.

A Tabela 6 mostra a composição química das argilas, onde é possível observar a presença de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  como os óxidos predominantes. Esses óxidos estão associados principalmente com a estrutura da caulinita. O  $\text{SiO}_2$  também está associado a partículas de quartzo e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , à gibsita (VIEIRA *et al.*, 2008).

Tabela 6. Composição química das argilas Cinza e Carolinho.  
Fonte: VIEIRA *et al.* (2008) e MONTEIRO *et al.* (2004) - modificados

Matérias-primas	Composições								
	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	PF
<b>Argila Cinza</b>	43,64	33,76	5,36	1,36	1,20	--	--	0,79	13,75
<b>Argila Carolinho</b>	50,79	29,15	3,63	1,83	1,83	0,22	0,15	0,96	11,84

O percentual de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  é responsável pela coloração das peças. Quanto maior a quantidade, mais avermelhado é o produto após a queima. É possível observar que o teor de óxidos alcalinos ( $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{Na}_2\text{O}$ ) é baixo. Como descrito por Monteiro *et al.* (2004), os óxidos alcalinos atuam como fundentes, contribuindo para a formação de

fase líquida a partir de 700°C, diminuindo então a porosidade nas peças. A quantidade de alcalinos terrosos (MgO e CaO) também é baixa, indicando uma quantidade mínima de carbonatos.

Os valores de perda ao fogo estão relacionados à desidroxilação dos argilominerais, oxidação de matéria orgânica, decomposição de carbonatos, sulfetos, hidróxidos (VIEIRA *et al.*, 2008). Uma perda ao fogo elevada pode ocasionar retração e porosidade durante a queima

A Tabela 7 apresenta a composição química da areia, onde é possível observar que é constituída basicamente de SiO<sub>2</sub>, que está associado ao quartzo. Os demais óxidos observados na composição química da areia são provenientes de eventuais impurezas como mica, feldspatos e minerais argilosos (VIEIRA, *et al.*, 2006).

Tabela 7. Composição química da areia.  
Fonte: (VIEIRA *et al.*, 2006)

Matéria-prima	Composições								
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	PF
Areia	86,66	7,53	0,82	0,31	1,90	0,67	0,45	-	1,34

### 4.3. Resíduo

De acordo com a norma NBR 10004 (2004), resíduos sólidos são definidos como: "... resíduos nos estados sólidos e semissólidos, que resultam de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos, nessa definição, os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados com equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água ou exijam, para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis, em face da melhor tecnologia disponível".

#### 4.3.1. Técnicas de disposição final de resíduos

Todos os resíduos que geramos devem ser destinados de forma correta a fim de que sejam evitados efeitos negativos no meio ambiente (como a poluição de rios e

do solo), e à saúde humana, já que podem ser responsáveis pela transmissão de diversas doenças. Para evitar, a classificação deve ser feita de forma que seja identificado o processo gerador, seus constituintes e a identificação dos possíveis constituintes nocivos à saúde. No Brasil, a norma NBR10004 trata dos critérios para a classificação dos resíduos quanto a sua composição e características, dividindo-os em:

- Resíduos Classe I ou perigosos
- Resíduos Classe II ou não-perigosos. Este último por sua vez é subdividido em :
  - Resíduos classe II A ou Não inerte
  - Resíduos classe II B ou Inerte.

Baseado na classificação acima que se determina as destinações adequadas para cada tipo de resíduo. De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/10), destinação final ambientalmente adequada de resíduos inclui: reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação e aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sistema Nacional do Meio Ambiente - SISNAMA, Sistema Nacional de Vigilância Sanitária – SNVS, e do Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária - SUASA. Existem também normas específicas sobre incineração, reciclagem e outras formas de tratamento dos resíduos que são empregadas antes da disposição final, ou seja, os resíduos são coletados, passam por estas etapas e somente o que sobra delas (ou o que não pode ser mesmo aproveitado) é destinado para os aterros.

#### **4.3.2. Biomassa vegetal**

O termo biomassa é definido como total de matéria orgânica, morta ou viva, existente nos organismos (animais ou vegetais) de uma determinada comunidade. A biomassa vegetal é uma forma indireta de aproveitamento da luz solar, dada pela conversão da radiação do sol em energia química por meio da fotossíntese, base dos processos biológicos dos seres vivos. (BRISTOTI; SILVA, 1993).

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (2015), a principal fonte de biomassa é:

De origem vegetal – grande parte da demanda energética brasileira ainda é atendida pela queima de madeira, uma porcentagem significativa dessa biomassa é desperdiçada, gerando elevado volume de resíduo, que se bem utilizado, significaria um acréscimo na geração de energia, principalmente, para comunidades que não são beneficiadas pelo sistema elétrico nacional (MMA, 2015).

Entre as biomassas de cultivos agrícolas, o bagaço e a palha de cana-de-açúcar estão entre as mais importantes, pois são aproveitadas nas caldeiras para gerar energia na usina, e o excedente energético, ainda é acrescido ao sistema elétrico. Assim como ocorre com a cana-de-açúcar, a grande maioria das culturas brasileiras gera biomassa que podem ser utilizadas para a geração de energia, no entanto, grande parte é perdida por queima na colheita ou retorna ao solo através da incorporação dos restos de cultura (MMA, 2015). Na Tabela 8, são apresentadas algumas vantagens da utilização da biomassa.

Tabela 8. As principais vantagens do emprego da biomassa vegetal  
Fonte: (MMA, 2015).

<b>Vantagens</b>
- Baixo custo de operação;
- Facilidade de armazenamento e transporte;
- Reaproveitamento dos resíduos;
- Alta eficiência energética;
- Fonte energética renovável e limpa;
- Emitir menos gases poluentes.

Ainda de acordo com o MMA (2015), como a biomassa tem sido bastante utilizada em fornos, caldeira, e geração de energia elétrica, evita a utilização de combustíveis fósseis, derivado do petróleo. Desta forma, pesquisas tem sido feita sobre a utilização deste material como fonte de energia limpa. Reis e Silveira (2000), discutem que se a biomassa for produzida de forma sustentável, praticamente todo o CO<sub>2</sub> liberado durante a queima do material, será extraído da atmosfera pela fotossíntese dos plantios de reposição.

Segundo dados do Ministério de Minas e energia (2015), a biomassa vem se tornando uma importante fonte de energia limpa, produzindo em abril do mesmo ano, um total de 12.417MW de potência. Com esta capacidade, torna-se a terceira matriz

elétrica mais importante, sendo superior a produção da usina de Belo Monte. Cerca de 7,4% da energia elétrica gerada no Brasil tem como fonte a biomassa, tendo como as principais fontes, o bagaço de cana, lixívia e lenha, sendo a biomassa proveniente da cana de açúcar a mais utilizada, representado 10 mil MW de capacidade (MME, 2014).

Em março de 2015, a produção de energia pela biomassa, teve um total de geração de aproximadamente 543 GWh, representando 1,1% de produção. Desde 2005, no Brasil, a capacidade de produção em usinas térmica a biomassa, teve um aumento de 8.362 MW. Esses valores pretendem ser aumentados até 2023, onde é esperado que haja um acréscimo de 4.200 MW potência (MNE, 2014).

#### **4.3.3. Disposição final de plantas aquáticas**

Devido ao crescimento rápido das plantas, para que não haja prejuízo ao meio, é necessário adotar medidas de controle, para não se tornarem prejudiciais aos múltiplos usos da água e dos corpos hídricos. Para Pompêo (2008), dentre os principais métodos de controle estão, o biológico, o mecânico, e o químico. O controle biológico é baseado na utilização de inimigos naturais da macrófita alvo, visando reduzir sua população de forma a não causar problemas ao corpo hídrico (PITELLI *et al.*, 2003). No método mecânico são utilizadas, pás, facas e bolsas vazadas para retirar as plantas, juntamente com o ancinho, uma máquina com lâminas giratórias, que elimina até raízes fixas no substrato (POMPÊO, 2008). O método químico, no Brasil não é autorizado, pois para a realização, são utilizados herbicidas para o controle de plantas aquáticas flutuantes e marginais (PITELLI *et al.*, 2008).

No Brasil, o descarte da biomassa de macrófitas em aterros sanitários é regulamentado pela Resolução CONAMA 308/2002 (Licenciamento ambiental de sistemas de disposição final dos resíduos sólidos urbanos gerados em municípios de pequeno porte), em aterros específicos (PÔMPEO, 2008), mas alguns autores propõem usos para a biomassa de macrófitas, evitando sua disposição final como resíduo sólido. A macrófita *P. stratiotes*, por exemplo, pode ser usada como fonte de aminoácidos para alimentação animal, já *E. crassipes* tem potencial como fertilizante do solo, devido aos teores elevados de cálcio, magnésio, zinco, ferro e cobre, e alta produção de biomassa (HENRY-SILVA e CAMARGO, 2006, 2008). A biomassa seca desta planta também pode ser utilizada para produção de gases em biodigestores,

principalmente o metano (HARDOIN e GONÇALVEZ, 2003), e ainda no artesanato (BORTOLOTTO e NETO, 2005).

#### **4.3.4. Reaproveitamento de resíduos em cerâmica**

Devido as características das argilas da região, o setor de cerâmica vermelha, é capaz de absorver com grande facilidade materiais alternativos em sua formulação (DONDI, 1997). Desta forma, esta propriedade das argilas favorece seu emprego na inertização dos resíduos. Por isso, a indústria cerâmica é uma das que mais se destaca na reciclagem de resíduos, possibilitando com seu elevado volume de produção, o consumo de grandes quantidades de resíduo (WENDER; BALDO, 1998).

As massas cerâmicas suportam a incorporação de vários tipos de resíduos, inclusive industriais e urbanos, que quando incorporados em quantidades adequadas, não causam grandes variações às propriedades. A utilização desses resíduos na fabricação de cerâmica faz com que ocorra uma redução no consumo de matérias-primas naturais, de modo que este recurso não renovável se torne mais duradouro (TALLINI Jr. *et al.*, 2007; JONKER; POTGIETER, 2005). Portanto, atualmente, a incorporação de resíduos em cerâmica vermelha é tida como uma solução correta do ponto de vista ambiental (VIEIRA *et al.*, 2006). Como destacado por Bonet (2002), uma das questões de fundamental importância para a sociedade é a necessidade de reaproveitar resíduos para recuperar matéria e energia, preservando recursos naturais, oferecendo menor degradação do meio ambiente e proporcionando melhorias nas condições de vida das comunidades.

#### **4.4. Utilização de biomassa de plantas aquáticas em cerâmica**

Neste item serão apresentados alguns trabalhos onde foram utilizadas biomassa de macrófitas junto à massa cerâmica na produção ceramista.

Albuquerque *et al.* (2010), avaliou a aplicabilidade das biomassas secas de *Salvinia auriculata* Aublet, *Pontederia parviflora* Alexander e *Comelinnea nudiflora* L em blocos cerâmicos. Foram utilizadas nos trabalhos porcentagens de 5 e 10% de biomassa. Os resultados obtidos mostraram-se bastante satisfatórios para os corpos de prova contendo 5% de resíduo, exceto para os resultados de absorção de água, já os que continham 10% de biomassa, extrapolaram levemente os valores limites. Os

dados de retração linear de queima dos corpos de prova que continham *Salvinia auriculata* incorporadas à argila aumentou conforme a porcentagem de biomassa, já para aqueles onde o resíduo incorporado era a macrófita *Pontederia parviflora* o autor notou uma homogeneidade nos valores uma vez que, mesmo com o desvio padrão, todos permaneceram na mesma faixa e, para os que continham biomassa seca oriunda de *Comelinnea nudiflora*, observou-se uma diminuição nos valores de retração linear de queima. Com os resultados, os autores concluem que é viável a confecção de blocos cerâmicos com biomassa, sendo uma boa alternativa de destinação correta da biomassa.

Albuquerque *et al.* (2011) incorporou quantidade de 5 e 10% de biomassa de *Comelinnea nudiflora* proveniente de processos de fitorremediação em blocos cerâmicos, Os resultados dos parâmetros de absorção de água e retração linear foram satisfatórios para todos os corpos de prova, estando de acordo com a literatura. O parâmetro perda ao fogo foi o que mais claramente demonstrou uma diferença entre os corpos de prova com incremento de biomassa seca e o testemunho. Essa diferença já era esperada, uma vez que nos corpos de massa com incremento de biomassa a quantidade de matéria orgânica presente é maior.

Já Albuquerque (2012), estudou confeccionar de blocos cerâmicos com incorporação de biomassa de *Pontederia parviflora* contaminada com cobre. Os resultados para retração linear após secagem, retração linear de queima e resistência à compressão foram plenamente satisfatórios para todos os corpos de prova testados, de acordo com valores recomendados pela literatura. Os resultados dos testes de perda ao fogo, de acordo com o recomendado pelo IPT (1985), e de absorção de água, segundo a NBR 7171 (ABNT, 1992), foram satisfatórios para os corpos de prova com incremento de 5% de biomassa vegetal. Segundo o autor, o método foi bastante eficaz, econômico e ambientalmente correto de se inertizar o cobre removido das águas residuárias, e que o reaproveitamento de sua biomassa na confecção de blocos cerâmicos é viável.

Ferreira *et al.* (2012) estudou a viabilidade da utilização da macrófita *Eleocharis* spp. como uma possível forma de resíduo na incorporação à massa argilosa para a fabricação de blocos cerâmicos, e constatou que o procedimento como um destino

sustentável é de possível realização. Os testes foram realizados com a adição de 5 e 10%, e não mostraram bons índices para os testes de absorção de água, tanto nos corpos de prova de 5% quanto nos de 10% de biomassa seca. Para a propriedade de perda ao fogo, mostram bons índices somente para os blocos com 5% de biomassa, e os testes de retração linear foram satisfatórios para todos os corpos de prova. Através dos índices de plasticidades os blocos com 5%, foram classificados como altamente plásticos e de 10% como média ou baixa plasticidade. Com os resultados obtidos, o autor concluiu que seriam necessários novos testes para verificar a quantidade ideal de biomassa a ser acrescentada à massa para a fabricação de blocos cerâmicos.

Locastro (2014) incorporou biomassa vegetal de *Thypha domingensis* Pers e *Pontederia parviflora* Alexander contaminada por cromo em blocos cerâmicos. O autor avaliou que os corpos de prova confeccionados obtiveram resultados satisfatórios, apresentando valores de resistência superiores a 1,5 MPa (NBR 7170/1983), atendendo aos parâmetros estabelecidos em norma vigentes. Já os corpos de prova com *P. parviflora* apresentaram baixa resistência, não se enquadrando então aos padrões de mercado. Para os testes de eficiência de remoção, o autor notou que *T. domingensis* obtiveram melhor absorção e acumularam cerca de 90% do cromo incipiente no sistema. Após testes de lixiviação, verificou-se a baixa concentração de cromo lixiviado, ficando então grande parte do composto aderido à massa cerâmica. Desta forma, os corpos de prova enquadraram-se nos parâmetros testados, podendo ser uma alternativa de destinação do material vegetal contaminado.

## 5. MATERIAS E MÉTODOS

A seguir serão descritos os materiais e os métodos empregados para caracterização das matérias primas, confecção dos corpos de prova, determinação de propriedades das cerâmicas produzidas e seus aspectos microestruturais. Na Figura 9 o fluxograma descreve a sequência experimental do trabalho.

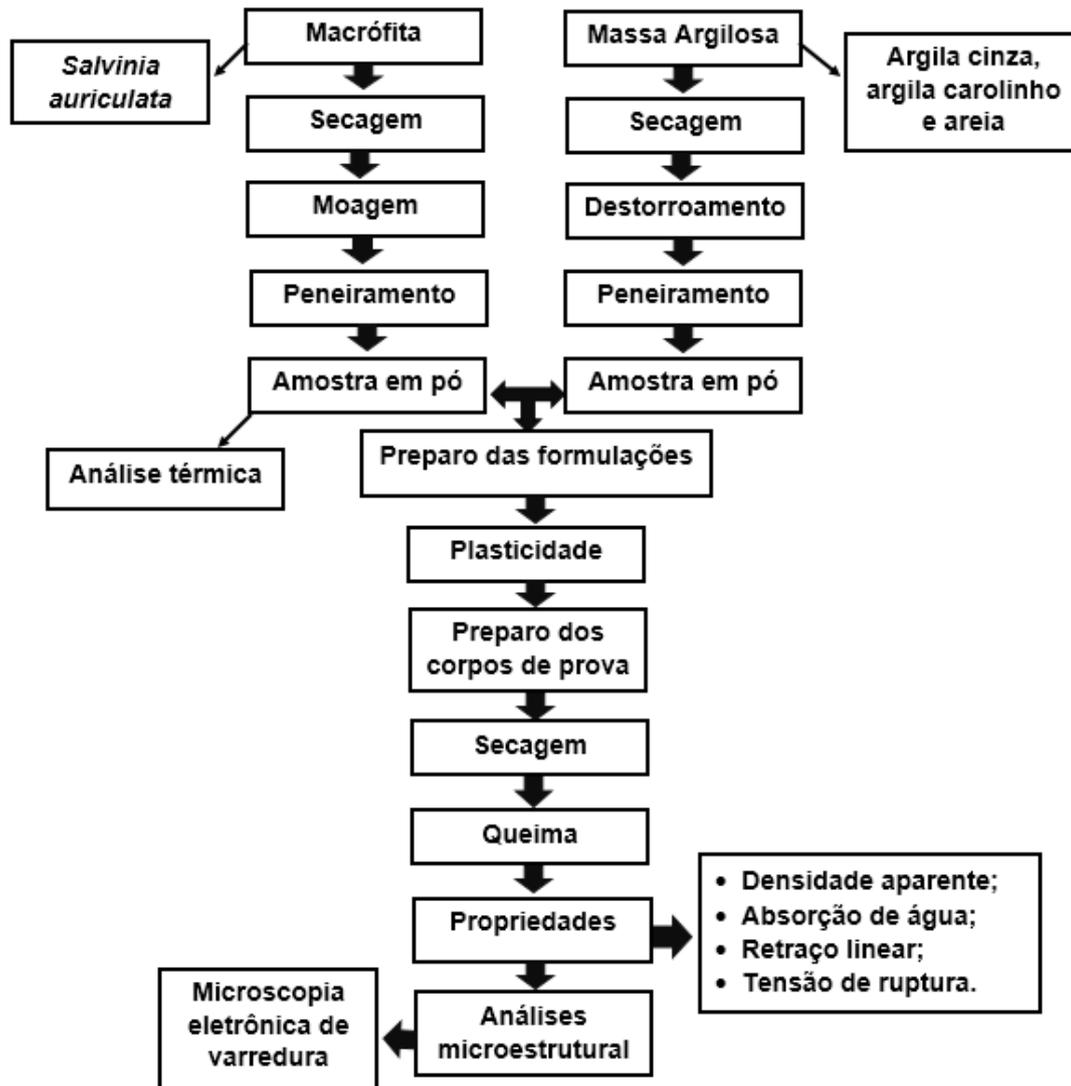


Figura 9. Fluxograma das etapas envolvidas na parte experimental.

## 5.1. Materiais utilizados

Neste trabalho foram utilizadas como matérias-primas: massa argilosa e biomassa seca da macrófitas *S. auriculata*. Na Figura 10 são apresentadas as matérias-primas utilizadas.

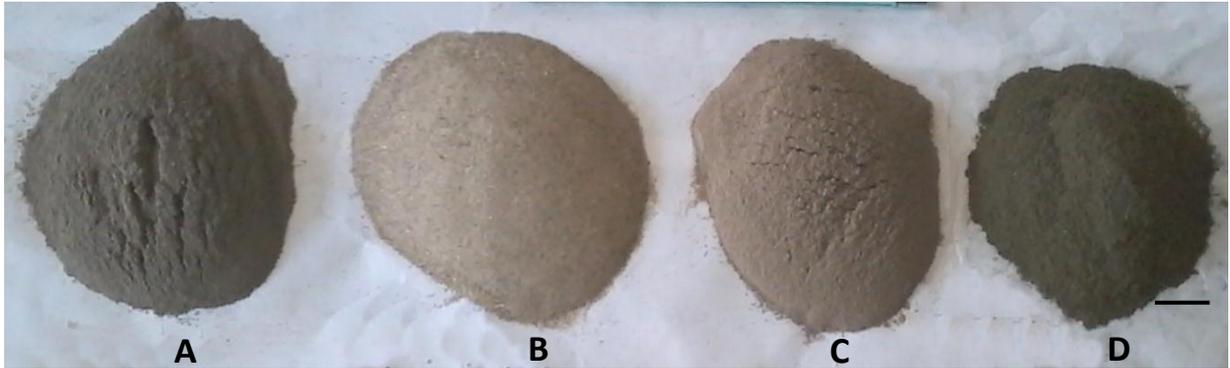


Figura 10. Matérias-primas que foram utilizadas nos experimentos, sendo: Argila cinza (A); areia (B), argila carolinho (C) e biomassa de *S. auriculata* (D). Foto: acervo da autora.

### 5.1.1. Macrófita *Salvinia auriculata* Aublet

*Salvinia auriculata* é uma macrófita aquática descrita por Aublet a partir de exemplares provenientes da Guiana, tendo ampla distribuição, estendendo-se do México e Ilhas Galápagos através da América Central e Antilhas e na maior parte da América do Sul, até o Brasil (Sculthorpe, 1967). *S. auriculata* é caracterizada como uma macrófita aquática flutuante que pertence à família Salviniaceae. Na Figura 11 a macrófita *Salvinia* é ilustrada.

Forno e Harley (1979) caracterizaram as *Salvínias* (*Salviniaceae*) como uma samambaia livre-flutuante, que consiste basicamente em um sistema de brotos. As duas folhas são verdes e flutuam, possuem na sua superfície pequenos pelos que funcionam como repelentes da água. As verdadeiras raízes estão ausentes, a terceira folha adaptou-se e submergiu absorvendo água e íons funcionando basicamente como uma raiz. É uma macrofita comum de água doce, e sob condições favoráveis é rapidamente disseminada por propagação vegetativa, que em condições ótimas, podem dobrar sua biomassa em 2 – 3 dias, colonizando extensas superfícies de água em um tempo reduzido (PEIXOTO *et al.*, 2005).



Figura 11. Imagem da macrófita *Salvinia auriculata*. Foto: acervo da autora.

*S. auriculata* tem sido uma das opções estudadas no processo de bioacumulação de metais encontrados em águas e efluentes (OUTRIDGE; HUTCHINSON, 1990), o que somado ao baixo custo da fitorremediação viabiliza seu largo emprego industrial. Desta forma, estudos recentes mostram que a biomassa de *Salvinia* possui alta capacidade de acumular íons metálicos (WOLFF *et al*, 2012), sendo tolerantes a poluente, de fácil amostragem e manuseio (ZHOU *et al*, 2008).

### 5.1.2. Matérias-primas argilosas

As matérias-primas argilosas utilizadas foram: argilas cinza, argila carolinho e areia, ambos do município de Campos dos Goytacazes, RJ. As matérias-primas foram cedidas pela Arte Cerâmica Sardinha, localizada no município de Campos dos Goytacazes – RJ.

Após a coleta, os materiais foram encaminhados ao Laboratório de Materiais Avançados – LAMAV da Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF.

## **5.2. Metodologias empregadas**

### **5.2.1. Beneficiamento das matérias-primas**

#### **5.2.1.1. Coleta das plantas**

As macrófitas aquáticas *Salvinia auriculata* foram coletadas na ETE de Araruama, Ponte dos Leites e transportadas até o campus da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF). Na UENF, as plantas foram secas em estufa com circulação de ar a uma temperatura de 60 °C por 48 h. Após serem secas, as plantas foram trituradas em liquidificador com lâmina de aço até obter um pó bem fino, e levado a uma peneira granulométrica com abertura de 40 *mesh* (420 µm), até passagem total do material. Depois de peneirado, o material foi acondicionado em sacos plásticos para posteriormente serem preparadas as composições utilização.

#### **5.2.1.2. Beneficiamento das argilas**

Em laboratório, as argilas e a areia foram secas em estufa a 110 °C por 24 h e posteriormente, foram desagregadas utilizando um triturador de mandíbula, para diminuir o tamanho das partículas. Após este processo, houve a desagregação das partículas através de almofariz de porcelana e pistilo, até passagem completa do material em peneira de 40 *mesh* (abertura de 420 µm).

##### **5.2.1.2.1. Preparo da massa argilosa**

Após o beneficiamento das matérias-primas argilosas, foi preparada uma mistura onde foram utilizadas proporções semelhantes as que são utilizadas na cerâmica. A mistura foi composta por: argila cinza, argila carolinho, e areia. Na Tabela 9 são apresentadas as porcentagens de cada matéria-prima utilizada.

Após pesadas as proporções, foram misturadas em moinho de bolas, sem as bolas, por aproximadamente 30 minutos, e acondicionadas em um saco, para então serem utilizadas para o preparo das formulações das massas.

Tabela 9. Matérias-primas e porcentagens utilizadas para o preparo da massa.

Matéria-prima	Porcentagem (%)
Argila cinza	60%
Argila carolinho	10%
Areia	30%

### 5.2.2. Formulações das massas cerâmicas

As composições foram preparadas utilizando a massa argilosa já preparada, descrita no **Item 5.2.1.2.1**. Foram formuladas massas com proporções de 0%, 2,5%, 5%, 7,5% e 10% em peso seco de biomassa da macrófita *S. auriculata* Aubl. de fitorremediação de ETE. Na Tabela 10 estão descritas as composições que foram estudadas.

Tabela 10. Composições utilizadas para o preparo dos corpos de prova.

Composições	Massa Argilosa (% em peso)	Biomassa seca (% em peso)
1	100,0	0,0
2	97,5	2,5
3	95,0	5,0
4	92,5	7,5
5	90,0	10,0

### 5.2.3. Processamento dos corpos de prova

Depois do preparo das formulações, as massas foram umedecidas com spray de água com 8% do peso da massa, de modo a possibilitar a conformação. Após, as massas foram novamente passadas em peneira 40 mesh, e acondicionadas em sacos plásticos por um período de 24 h para uma melhor uniformidade da umidade.

Os corpos de prova foram feitos por prensagem uniaxial, onde foi utilizada uma matriz retangular com dimensões 114 X 25,0 X 11,0 mm, com pressão de 35MPa.

Após a conformação, os corpos de prova foram colocados em estufa a 110 °C por 24 h até atingirem peso constante. Assim que retirados, foram medidas suas dimensões, com o auxílio de paquímetro digital da marca MITUTOYO (resolução  $\pm$

0,01 mm), e pesados utilizando balança digital INSTRUTHERM, modelo Bd-600 (precisão 0,1g).

Os corpos de prova após secos, foram queimados em forno laboratorial tipo mufla, com taxa de aquecimento de 2 °C/min, com temperatura de patamar de 750 °C, 850 °C, 950 °C e 1050 °C, e mantidos a temperatura de patamar por 180 min. O resfriamento foi dado por uma taxa de 2 °C/min, até atingir a temperatura ambiente.

Quando retirados do forno, os corpos de prova foram medidos e pesados, utilizando-se respectivamente paquímetro digital de marca MITUTOYO (resolução  $\pm$  0,01 mm) e balança digital Instrutherm modelo Bd-600 (precisão 0,1g). Após feitas as medidas e pesagem, foram determinadas as características físicas e mecânicas das amostras.

#### **5.2.4. Análise Térmicas termogravimétricas (DSC/TG/DTG)**

Foram realizadas Análises Térmicas termogravimétricas (DSC/TG/DTG) da amostra de biomassa, onde 2 g do material peneirado a 230 mesh foram conduzidos simultaneamente em um analisador térmico de modelo TA SDT 2960 a uma taxa de aquecimento de 10°C /min até a temperatura máxima de 1050 °C. As amostras foram analisadas no Laboratório de Materiais Avançados, na Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF.

#### **5.2.5. Determinações das propriedades**

##### **5.2.5.1. Plasticidade**

Uma massa cerâmica deve possuir condições próximas ao ideal para atender características de uma boa moldagem, secagem e queima, objetivando um produto final de qualidade apropriada. Desta forma, o ideal é que se tenha plasticidade e fusibilidade visando boa trabalhabilidade e resistência mecânica de queima.

Desta forma, foi realizado um ensaio de plasticidade nas formulações preparadas, afim de investigar o comportamento de extrusão das mesmas. A plasticidade foi determinada de acordo com as normas da ABNT NBR-7180 e NBR-6454. O índice de plasticidade (IP) de Atterberg é dado por:

$$IP = LL - LP \quad (1)$$

Onde, o Índice de Plasticidade (IP) representa a diferença entre o LL e o LP, indicando a faixa de consistência plástica.

Limite de plasticidade (LP) é o teor de água, expresso em % do peso de pasta seca a 110°C, acima do qual a massa argilosa pode ser moldada.

Limite de liquidez (LL) é o teor de água, expresso em % do peso da pasta seca a 110°C, acima do qual a massa argilosa consegue juntar os dois lados do sulco formados na massa. O ensaio foi realizado no LAMAV / UENF.

Através dos valores de índice de plasticidade, pode-se avaliar a adequação da matéria-prima utilizada com relação à moldagem de peças.

#### **5.2.5.2. Densidade aparente a seco**

Para a determinação da densidade aparente das peças secas foram realizadas medições do comprimento dos corpos de prova com auxílio de um paquímetro digital marca MITUTOYO (resolução +/- 0,01mm) e as massas dos mesmos foram determinadas através de uma balança digital Shimadzu modelo S3000 (precisão de 0,01g). A densidade aparente é calculada utilizando a seguinte expressão:

$$\rho_{ap} = \frac{M}{V} \quad (2)$$

$\rho_{ap}$ : densidade aparente da peça seca ou queimada (g/cm<sup>3</sup>);

M: massa (g);

V: volume (cm<sup>3</sup>) dos corpos de prova, secos ou queimados, respectivamente.

### 5.2.5.3. Absorção de água

O ensaio de absorção de água foi realizado de acordo com a norma ASTM C373-72. Os corpos de prova foram pesados, em seguida colocados em recipiente com água, mantidos em água fervente por 2 horas, e resfriados submersos em água corrente até temperatura ambiente. Em seguida, foi retirado o excesso da água superficial de cada peça, registrando-se então a massa novamente.

A absorção de água (AA) foi calculada de acordo com a seguinte expressão:

$$AA (\%) = \frac{m_u - m_s}{m_s} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

AA = A absorção de água em % de água absorvida;

$m_s$  = massa seca (g);

$m_u$  = massa úmida (g) das peças saturadas em água.

### 5.2.5.4. Retração linear

A retração linear das peças queimadas (RL) foi determinado com o auxílio de um paquímetro digital marca MITUTOYO (resolução $\pm$  0,01 mm), através da seguinte expressão:

$$RL (\%) = \left( \frac{L_0 - L}{L_0} \right) * 100 \quad (3)$$

Onde:

RL = Retração linear, expressa em % de dimensão retraída;

$L_0$  = Comprimento do corpo de prova seco, expresso em mm,;

L = Comprimento do corpo de prova queimado, expresso em mm.

### 5.2.5.5. Tensão de ruptura à flexão

A tensão de ruptura à flexão em três pontos ( $\sigma$ ) foi determinada de acordo com a norma ASTM C674-77, utilizando uma máquina universal de ensaios de marca *Instron* e modelo 5582. A tensão de ruptura à flexão foi obtida usando a seguinte expressão:

$$(\sigma) = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (5)$$

Onde :

$\sigma$ : tensão de ruptura à flexão, (MPa);

P: carga aplicada no corpo de prova no momento da ruptura, (Newton);

L: distância entre os cutelos de apoio, (mm);

b: largura do corpo de prova, (mm);

d: é a espessura do corpo de prova, (mm).

### 5.2.6. Análise Microestrutural

As cerâmicas queimadas foram selecionadas para avaliação da microestrutura, através de Microscopia eletrônica de varredura. As fases formadas durante a queima também foram investigadas através da técnica de DRX.

#### 5.2.6.1. Microscopia eletrônica de varredura

Após serem sinterizadas, as peças foram cortadas com disco diamantado. Para a realização da análise de microscopia eletrônica de varredura, foram selecionados um exemplar das porcentagens de 0,0 e 5,0 % resíduo, de cada uma das temperaturas de 850 °C e 1050 °C. As peças foram coladas com fita de carbono em uma superfície lisa, e passaram pelo processo de metalização, com uma fina camada de platina. As observações das microestruturas do material foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), em um equipamento da marca SHIMADZU, modelo SSX-550, com espectrômetro de energia dispersiva (EDS) acoplado, do LAMAV-UENF.

## **5.2.6.2. Caracterização mineralógica**

### **5.2.6.2.1. Difração de raios X da peça queimada**

A composição mineralógica dos corpos de prova com 0% de resíduo, queimado na temperatura de 850 °C, foram determinadas pelo método de difração de raios X, no Laboratório de Materiais Avançados – LAMAV do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF). O XRD7000 foi o difratômetro utilizado, da marca Shimadzu, e operou com radiação cobre (Cu-K $\alpha$ ) e varredura  $2\theta$  variando de 3° a 60°, com passo de 0,02° e tempo de 5s.

## **5.2.7. Levantamento econômico**

Foi feito um levantamento econômico para avaliar a eficiência energética durante a queima da cerâmica incorporada com biomassa, levando em consideração os tipos de fornos e poder calorífico dos combustíveis utilizados para a queima da cerâmica vermelha.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1. Análise de calorimetria exploratória diferencial (DSC)

A Figura 12 apresenta as curvas de DSC/TG/DTG da biomassa de *S. auriculata*. Nota-se que há uma perda de massa inicial de 7,2% a 56,2 °C, associada à eliminação de água de umidade. Em seguida, ocorre um pico exotérmico a 320,64°C associado a uma significativa perda de massa de 41,91%. Esta reação é atribuída à combustão da matéria orgânica e libera 2683 J/g de calor ou 640.8 Kcal/Kg. A 535,38°C ocorre ainda uma outra reação exotérmica com perda de massa de 16,6%. A energia térmica liberada nesta reação corresponde a aproximadamente 28% da energia liberada na reação anterior. Entretanto, esta reação ocorre ainda numa faixa de temperatura compatível com a queima de cerâmica vermelha, o que pode se somar ao calor da combustão da matéria orgânica, e contribuir para a redução do gasto energético durante a queima da cerâmica. Esta questão é abordada mais adiante. Esta última reação exotérmica pode ser atribuída a um composto orgânico com ligações químicas mais fortes em comparação com a reação anterior ou ainda à combustão de carbono remanescente de oxidação da matéria orgânica. A técnica de espectrometria de massas, não realizada neste trabalho, pode contribuir para a identificação correta desta reação.

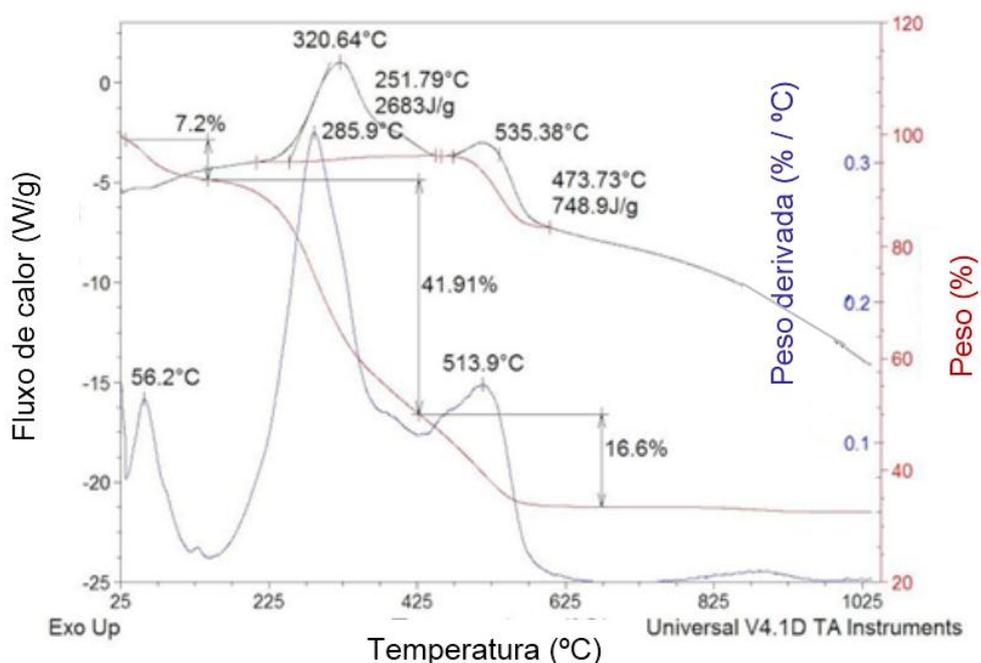


Figura 12. Análise de DSC/TG/DTG da biomassa de *S. auriculata*.

## 6.2. Dilatometria

As curvas da dilatometria das massas cerâmicas contendo 0% e 10% estão representadas na Figura 13. Nota-se um comportamento similar entre as duas curvas até aproximadamente 400 °C. É visto um declive em ambas as curvas iniciando em 100 °C, este declive está relacionado possivelmente à evaporação da água de umidade, com conseqüente retração dos corpos-de-prova. Após 200 °C, as curvas se estabilizam, e possuem gradual aumento relacionado à dilatação térmica intrínseca do material.

As duas curvas possuem comportamentos diferentes na faixa de temperatura entre 350 °C e 900 °C. Na massa cerâmica contendo 0% de biomassa, ocorre a retração proveniente da desidroxilação da caulinita, qual inicia em aproximadamente 570 °C. A taxa de retração nesta curva sofre uma redução a partir de 600 °C, isto se deve à dois fenômenos concorrentes nesta faixa de temperatura, quais são a desidroxilação da caulinita, causando a retração, e a transformação alotrópica do quartzo, responsável pelo aumento volumétrico desta estrutura cristalina, e por isso reduz a taxa de contração (CARTY e SENAPATI, 1998). A partir desta temperatura a estrutura experimenta constante retração até aproximadamente 900 °C, logo após, ocorre brusca queda na curva, possivelmente responsável pela sinterização por formação de fase líquida, levando à intensificação da densificação do corpo cerâmico (NORTON, 1973).

Analisando a curva da massa cerâmica contendo 10% de biomassa, é visto que por volta de 350°C, ocorre a retração do corpo cerâmico logo após à dilatação térmica, temperatura está referente à combustão da matéria orgânica, representando um total de 42,92 %. Em torno de 500 °C ocorre o aumento da taxa de retração, este evento está associado à desidroxilação da caulinita. Em torno de 570 °C é observado um evento responsável pela dilatação da estrutura. Este evento pode estar correlacionado à duas causas, sendo elas a transformação alotrópica do quartzo, com respectivo aumento volumétrico desta estrutura cristalina, e também pode ser devido a gases da combustão de matéria orgânica aprisionados. Depois, por volta de 900 °C, a matéria orgânica presente já foi liberada prevalece então as fases da cerâmica (NORTON, 1973).

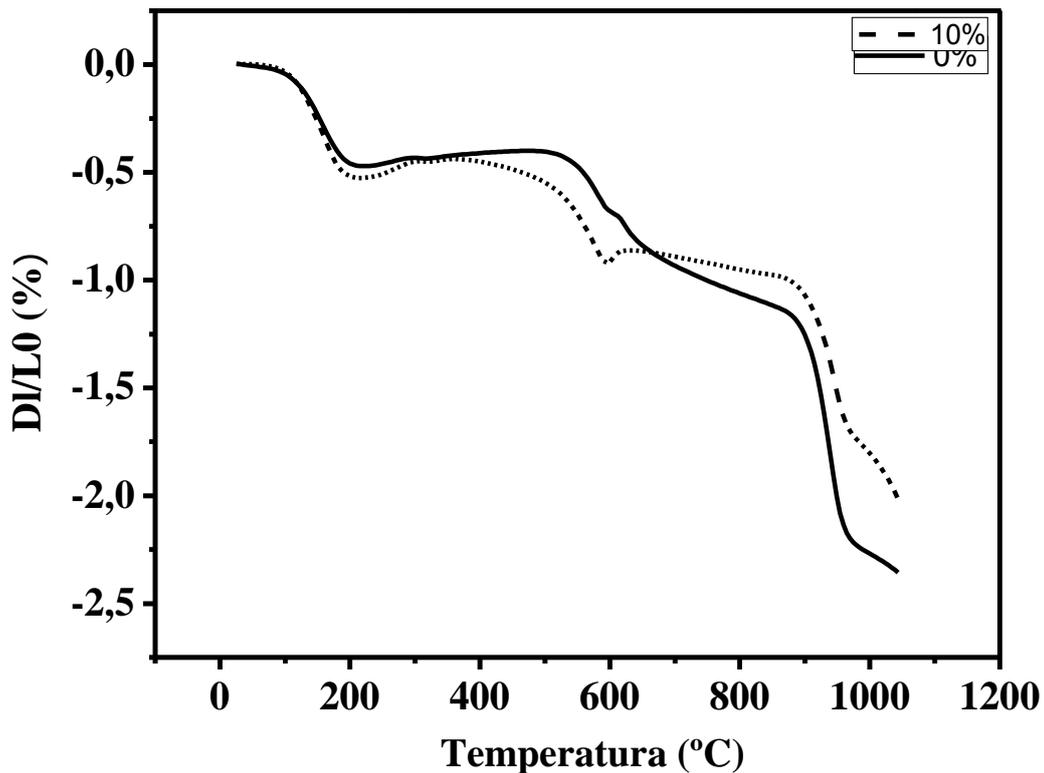


Figura 13. Curvas dilatométricas das massas com 0% e 10% de biomassa

### 6.3. Propriedades das massas cerâmicas

#### 6.3.1. Plasticidade

A tabela 11 apresenta os valores de plasticidade de Atterberg das composições com 0%, 2,5%, 5%, 7,5% e 10% de resíduo. Nota-se que a plasticidade das massas cerâmicas aumentou com a adição de resíduo incorporado.

Diversos trabalhos já reportaram o efeito da matéria orgânica na plasticidade de argilas (MACEDO *et al.*, 2008; OLIVEIRA *et al.*, 2004), mas o efeito da matéria orgânica na plasticidade das argilas é bem contraditório. É comum autores citarem que a sua presença promove um aumento de plasticidade, mas outros afirmam que isto deve ser avaliado, principalmente em qual segmento vai ser aplicado (MENEZES *et al.*, 2014), qual argila a ser utilizada, e principalmente a quantidade a ser incorporada (RIBEIRO *et al.*, 2004).

Este aumento de plasticidade devido a incorporação da biomassa não é benéfico para a massa cerâmica investigada neste trabalho, conforme mostrado na Figura 14. Nesta Figura, está representado o prognóstico de extrusão das massas

cerâmicas contendo 0%, 2,5%, 5%, 7,5% e 10% de resíduo. Este prognóstico relaciona a propriedade plástica da massa cerâmica com a etapa de extrusão, indicando limites ideais e aceitáveis para a correta extrusão. A massa pura (0%), contendo apenas argila e areia da região de Campos dos Goytacazes, e as massas contendo 2,5% e 5% de biomassa, localizaram-se dentro da região de extrusão aceitável, e as massas com 7,5 e 10% de biomassa ficam fora desta região. Marsigli e Dondi (1997) sugerem valores de LL e IP para os comportamentos ótimo e aceitável na extrusão. Eles determinam que o IP deva variar entre 15% e 25%, enquanto o LP deve variar entre 18% a 25%. Desta forma, percebe-se que as formulações estão fora destas faixas, indicando a possível problemática no processamento do material, aferindo à massa uma maior plasticidade. Com isso, é necessário adicionar maior quantidade de água na etapa de conformação, aumentando então o custo na etapa de secagem, podendo acarretar trincas e deformações, devido à maior retração de secagem das peças.

Tabela 11. Limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade das massas cerâmicas com proporções de 0, 5 e 10 % de biomassa de *S. auriculata*.

<b>Biomassa seca (%)</b>	<b>LL (%)</b>	<b>LP (%)</b>	<b>IP (%)</b>
<b>0%</b>	41,6 %	26,9 %	14,7 %
<b>2,5%</b>	47,1 %	27,6 %	19,6 %
<b>5%</b>	49,8 %	29,0 %	20,8 %
<b>7,5%</b>	51,6 %	31,0 %	20,6 %
<b>10%</b>	54,9 %	32,3 %	22,6 %

As argilas de Campos dos Goytacazes são caracterizadas por apresentar elevada plasticidade, sobretudo, devido à excessiva quantidade de argilominerais (SOUZA *et al.*, 2005; VIEIRA *et al.*, 2002; NORTON, 1973). Desta forma, deve-se ponderar o teor de biomassa incorporado na massa cerâmica tendo em vista sua interferência negativa, neste caso, na plasticidade das massas cerâmicas locais.

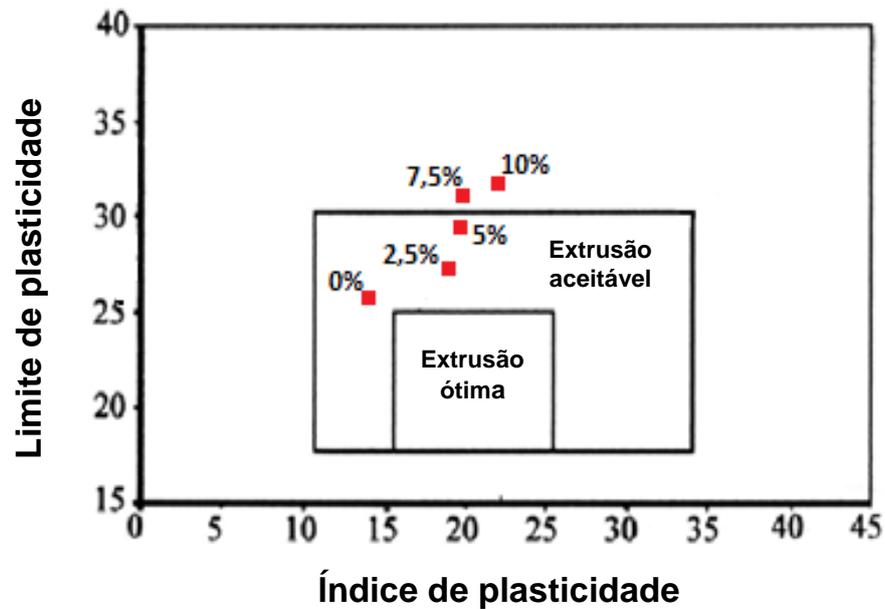


Figura 14. Prognóstico de extrusão por meio dos limites de Atterberg.

### 6.3.2. Densidade aparente

A densidade aparente a seco, bem como a densidade aparente de queima das cerâmicas são apresentadas na Figura 15 e 16. Nota-se na Figura 15a que estatisticamente não há redução na densidade aparente a seco da cerâmica com a incorporação da biomassa. Como a biomassa apresenta uma densidade real menor que a argila, faixa de 1 a 1,2 g/cm<sup>3</sup> contra 2,5-2,7 g/cm<sup>3</sup> é de se esperar menores valores de densidade, entretanto, obrigatoriamente ocorrer redução de empacotamento.

Já na Figura 15b, nota-se uma forte tendência de redução da densidade aparente de queima da cerâmica com o aumento de biomassa incorporada. Neste caso, a elevada perda de massa da biomassa durante a queima, contribui significativamente para este resultado. Quando analisado por temperatura, como é apresentado na Figura 16, é possível observar que não há uma diferença significativa entre as quatro temperaturas investigadas.

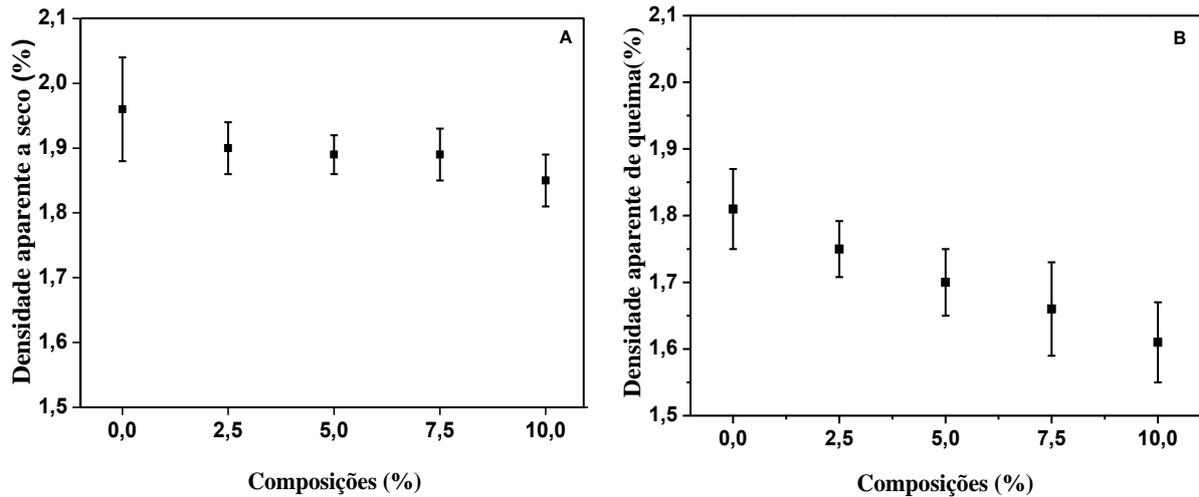


Figura 15. Densidade aparente a seco (A) e de queima (B) das cerâmicas com incorporação de 0%, 2,5%, 5%, 7,5% e 10% de biomassa de *S. auriculata*.

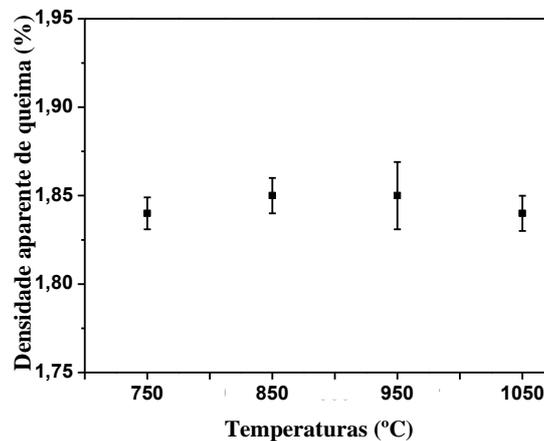


Figura 16. Densidade aparente queima das cerâmicas com incorporação de biomassa de *S. auriculata* queimadas nas temperaturas: 750 °C, 850 °C, 950 °C e 1050 °C.

## 6.4. Propriedades tecnológicas de queima

### 6.4.1. Absorção de água

As Figuras 17 e 18 apresentam a absorção de água (AA) das composições em função da temperatura de queima. É possível observar que não há variação significativa na AA das composições nas temperaturas entre 750 e 950 °C. Já a 1050 °C, ocorre uma brusca redução da AA, associada a maior formação de fase líquida, principal mecanismo de sinterização de cerâmica silicática (NORTON, 1973). Nota-se ainda que a AA aumenta com a incorporação de biomassa para todas as temperaturas de queima. Na média, com 2,5% de biomassa incorporada, o aumento na AA da

massa cerâmica foi de 19,71%. Para 10% de biomassa, o aumento médio foi de 26,29%. Estes resultados são explicados pela combustão dos compostos orgânicos da biomassa durante a etapa de queima, associada a uma perda de massa de 58,5%, que acarreta porosidade na cerâmica.

Os gráficos da Figura 17 e 18 estão delimitados com o valor máximo de absorção de água permitido por normas técnicas para blocos de vedação, 22% (NBR, 2005), e telhas, 20% (NBR, 2009). Nota-se que em todas as composições a massa argilosa padrão, 0% de resíduo, atendeu a especificação de AA para blocos de vedação. Para telhas, considerando as barras de erro, a massa argilosa ficou no limite máximo nas temperaturas de 750, 850 e 950 °C, e abaixo do valor máximo de 20% na temperatura de 1050 °C. Já as composições com biomassa incorporada, observa-se que na temperatura de 750 °C nenhuma composição com biomassa alcançou a especificação de AA para blocos de vedação. Nas temperaturas de 850 e 950 °C, somente a composição com 2,5%, considerando as barras de erro, atendeu ao valor de AA exigido. Já a 1050 °C, a composição com 2,5% atendeu a exigência de AA para telhas e com 5%, para blocos de vedação.

Estes resultados mostram que este tipo de biomassa deve ser incorporado em pequenas quantidades, até 2,5%, aproximadamente, para não prejudicar demasiadamente a AA da cerâmica. Logicamente, que os valores obtidos podem ser reduzidos proporcionalmente com o aumento do empacotamento das massas durante a etapa de conformação.

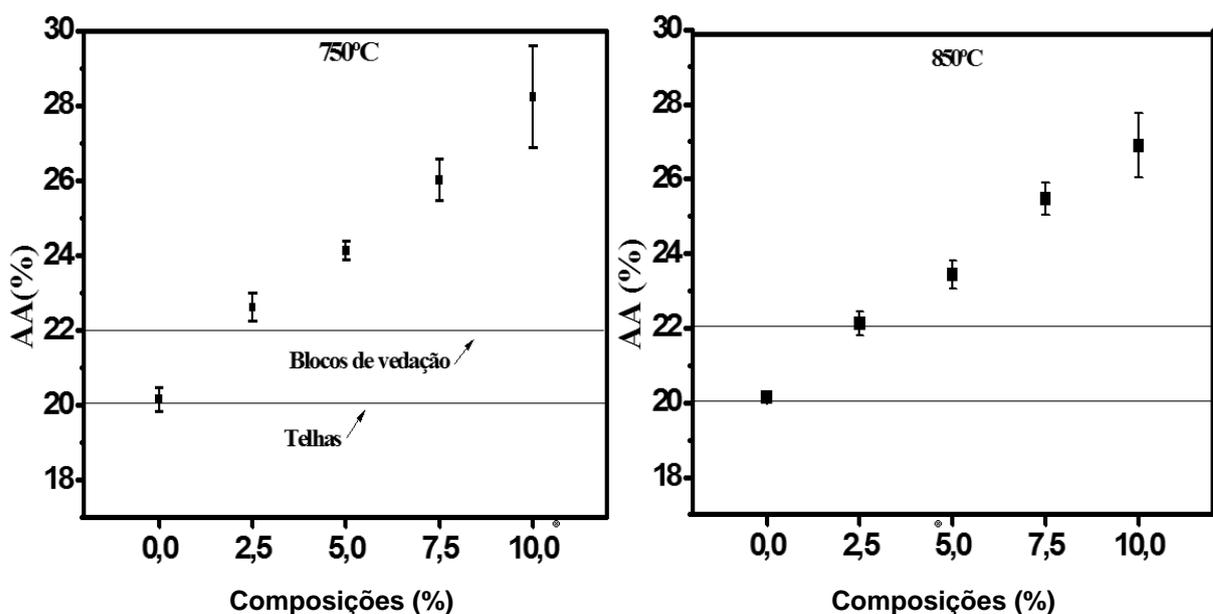


Figura 17. Absorção de água das composições em função da temperatura de queima.

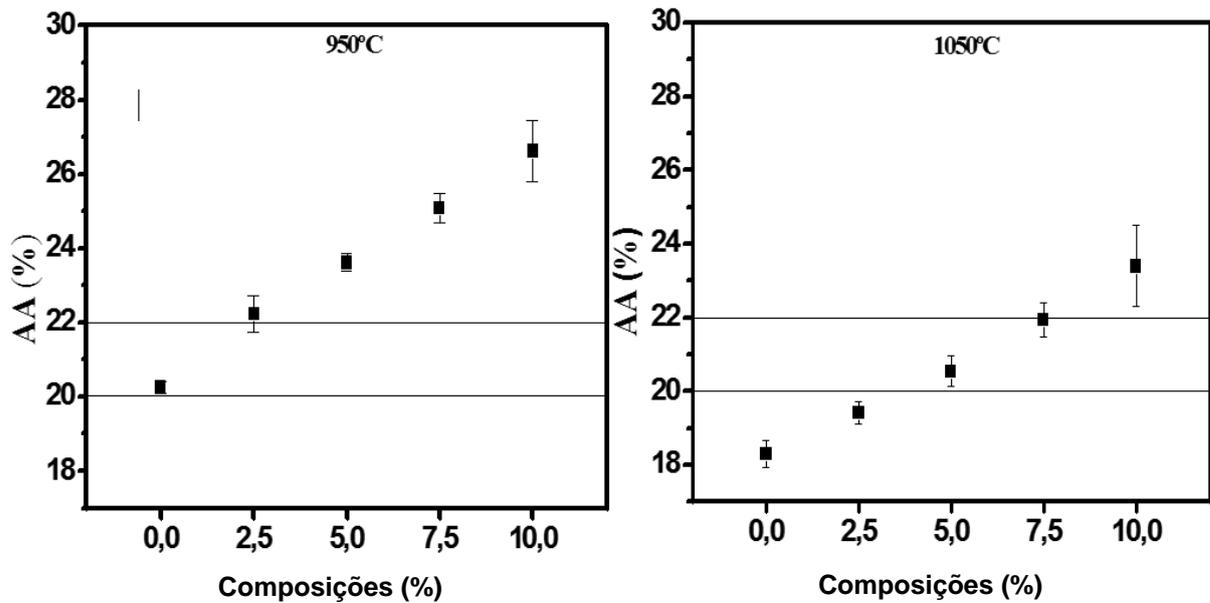


Figura 18. Absorção de água das composições em função da temperatura de queima.

#### 6.4.2. Retração linear

As Figuras 19 e 20 mostram o comportamento da retração linear (RL) das composições em função da temperatura de queima. Observa-se que a retração linear aumenta de acordo com o aumento da temperatura de queima para todas as composições, sobretudo, na temperatura de 1050 °C. Isto é devido à consolidação das partículas por formação de fase líquida, que promove sua aproximação, o que acarreta retração. Nota-se ainda que a biomassa praticamente não altera a retração linear da massa argilosa, considerando as barras de erro.

Nota-se ainda que a retração máxima de queima recomendada de cerâmica vermelha, 2% (MÁS, 2002) só é ultrapassada na temperatura de 1050 °C para todas as composições.

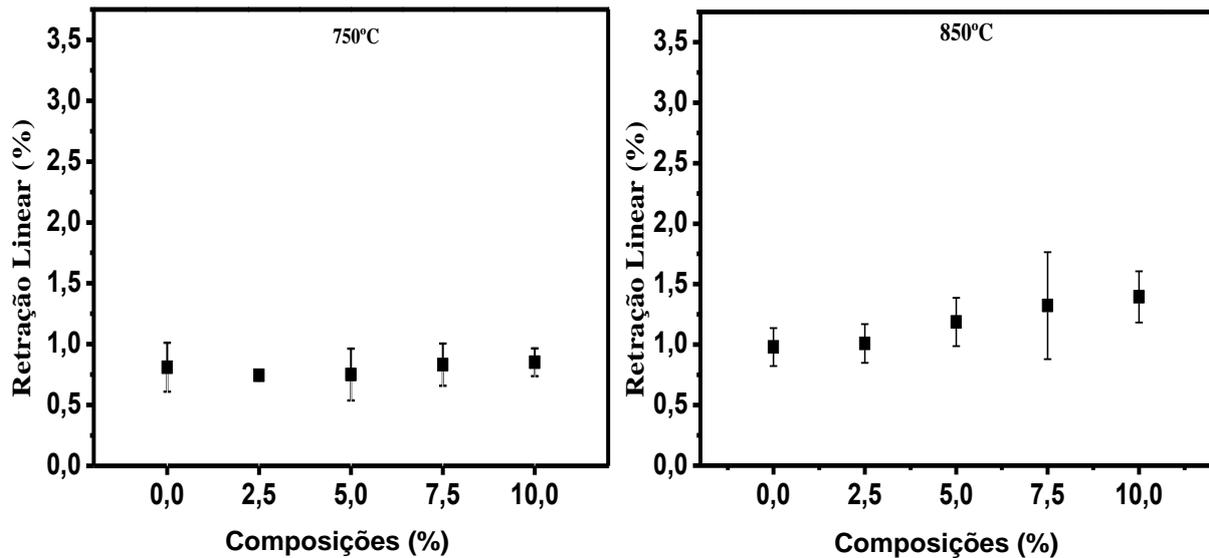


Figura 19. Retração linear das peças queimadas em 750 e 850 °C.

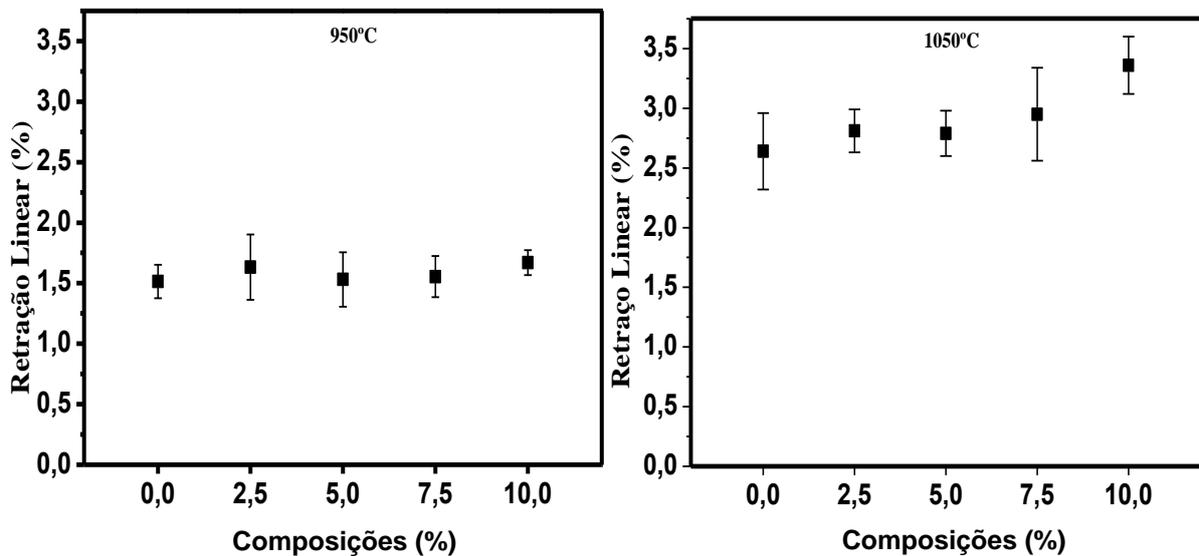


Figura 20. Retração linear das peças queimadas em 950 e 1050 °C.

#### 6.4.3. Resistência mecânica

As Figuras 21 e 22 mostram a tensão de ruptura à flexão das composições em função da temperatura de queima. Nota-se que ocorre um aumento da resistência mecânica das composições com o incremento da temperatura de 750 para 850 °C. A partir daí a resistência mecânica de todas as composições praticamente se mantém constante. Já incorporação de biomassa prejudica significativamente a resistência mecânica da composição padrão. Com 10% de biomassa incorporada a queda da resistência mecânica nas temperaturas investigadas foi na média de cerca de 55%.

Já com 2,5% de biomassa, a queda na resistência mecânica da cerâmica foi de aproximadamente 27,4%.

As Figuras 21 e 22 mostram ainda que nenhuma composição investigada alcançou os valores mínimos recomendados de tensão de ruptura à flexão para telhas, 6,5 MPa, e blocos de vazados, 5,5 MPa. Já para tijolos maciços, considerando as barras de erro, todas as composições, com exceção das composições com 7,5 e 10% de biomassa queimadas a 750 °C, alcançaram o valor mínimo sugerido de 2 MPa (SANTOS, 1989).

A redução da resistência mecânica da cerâmica com biomassa também está associada à elevada perda de massa durante a queima que acarreta porosidade. Este é o principal fator limitante da quantidade de biomassa que pode ser incorporada na cerâmica, já que a resistência mecânica e a absorção de água são as propriedades mais importantes da cerâmica e ainda são regidas por normas técnicas.

Embora a redução da resistência mecânica da massa argilosa padrão com a incorporação de biomassa só tenha sido prejudicada no sentido de não se enquadrar na fabricação de determinado tipo de produto de cerâmica vermelha, com 7,5 e 10% a 750 °C, a avaliação conjunta com a absorção de água indica um percentual de incorporação máximo ao redor de 2,5% ou menos.

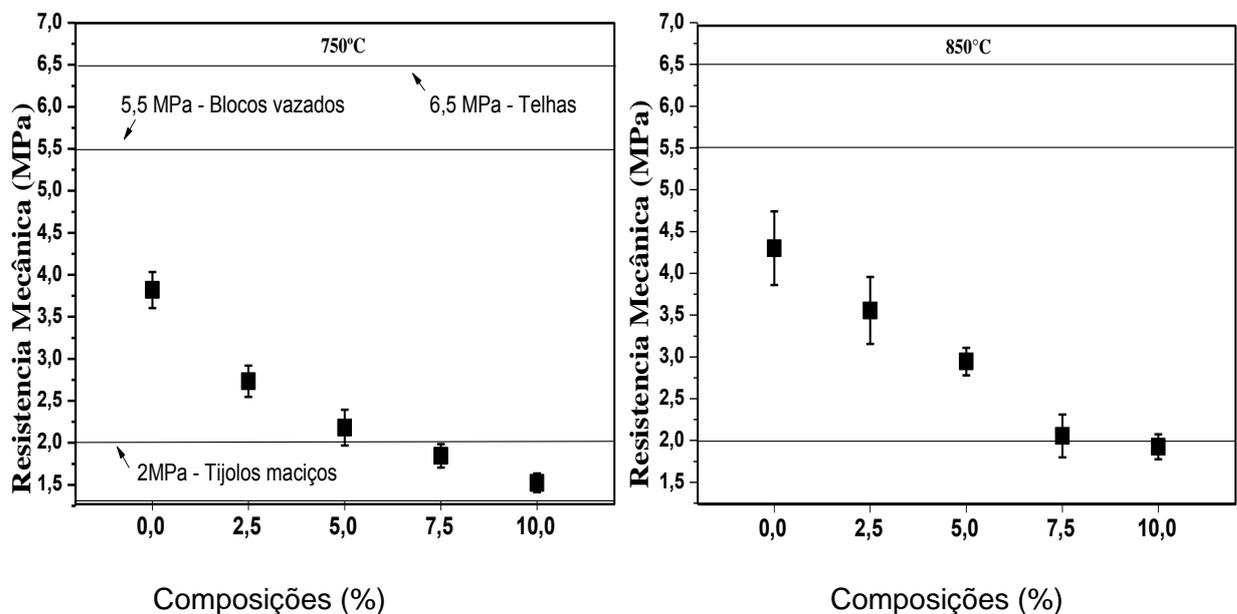


Figura 21. Resistência mecânica das peças queimadas em 750 e 850 °C.

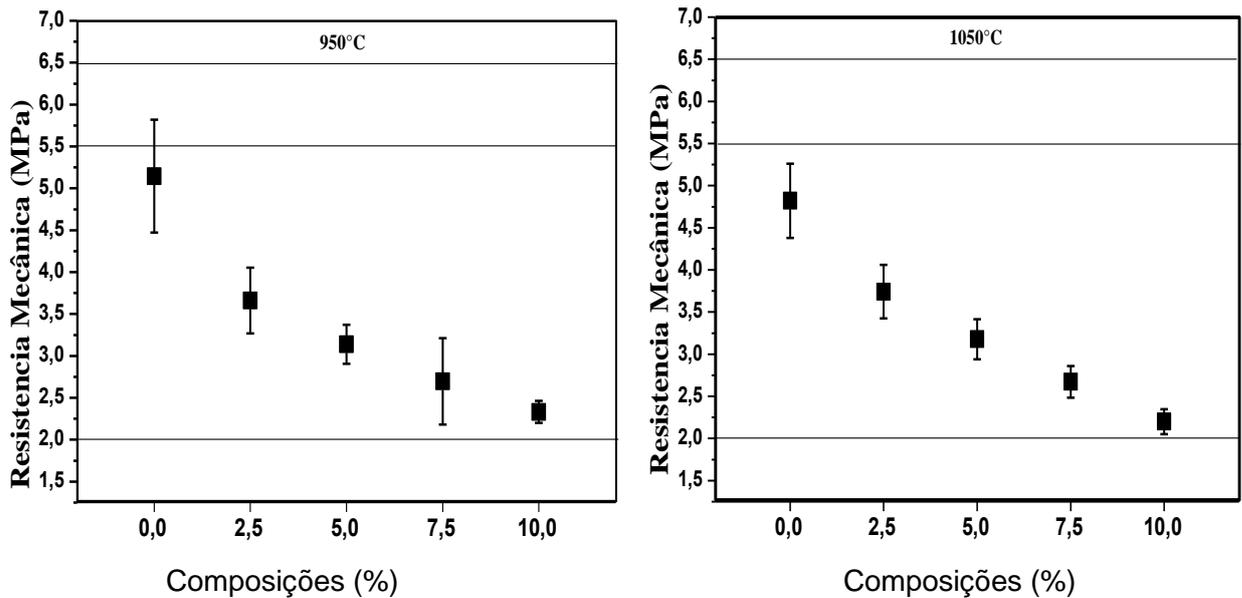


Figura 22. Resistência mecânica das peças queimadas a 950 e 1050 °C.

#### 6.4.4. Microscopia eletrônica de varredura

Nas Figuras 23 a 26 estão representadas as micrografias de MEV das cerâmicas com 0% e 5% de biomassa, queimada nas temperaturas de 850 e 1050 °C.

Na Figura 23 (b), observa-se que na peça com 0% de biomassa, queimada a 850 °C, apresenta uma superfície rugosa com presença de partículas de quartzo. Na Figura 24 (b), quando queimada a 1050 °C, ainda apresenta partículas de quartzo, no entanto, é verificada menor rugosidade da superfície, indicando maior grau de sinterização.

Nas cerâmicas com incorporação de 5% de biomassa (Figura 25), e queimada a 850 °C, é possível notar uma superfície rugosa, possuindo microtrincas, qual é responsável pelo aumento da absorção de água. Com a adição de biomassa houve aumento da quantidade de poros na peça, devido a queima da matéria orgânica e liberação de CO<sub>2</sub>.

Na Figura 26, estão representadas as imagens da MEV das peças contendo 5% de resíduo e queimadas a 1050°C. Como já descrito na literatura, nesta temperatura ocorre a formação de fase líquida, responsável pela redução da porosidade, consequência das reações que ocorrem durante sinterização (NORTON, 1973). Portanto, é possível notar uma superfície mais lisa e com menor quantidade de microtrincas, quando comparada com as imagens obtidas da peça cerâmica com 5%

de biomassa e queimada a 850 °C. Os resultados de AA corroboram com os observados nestas figuras, pois para o mesmo teor de biomassa incorporado (5%) em 1050 °C obteve menor média de AA do que em 850 °C.

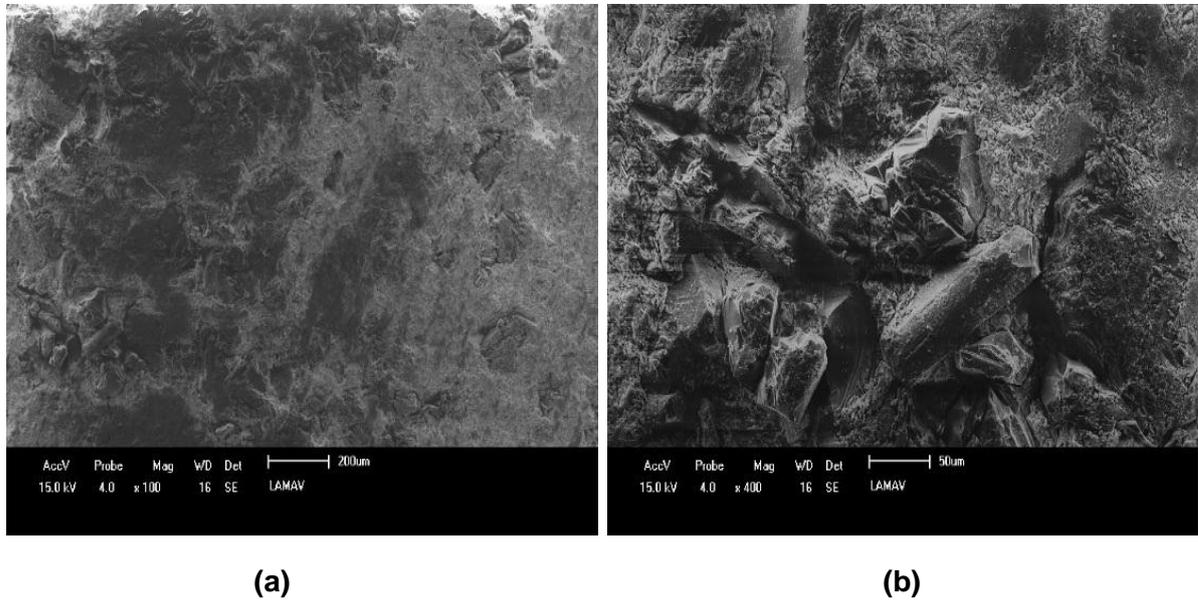


Figura 23. Microscopia eletrônica de varredura da argila 0% resíduo na temperatura de 850 °C com aumento de 100x (a) e 400x (b).

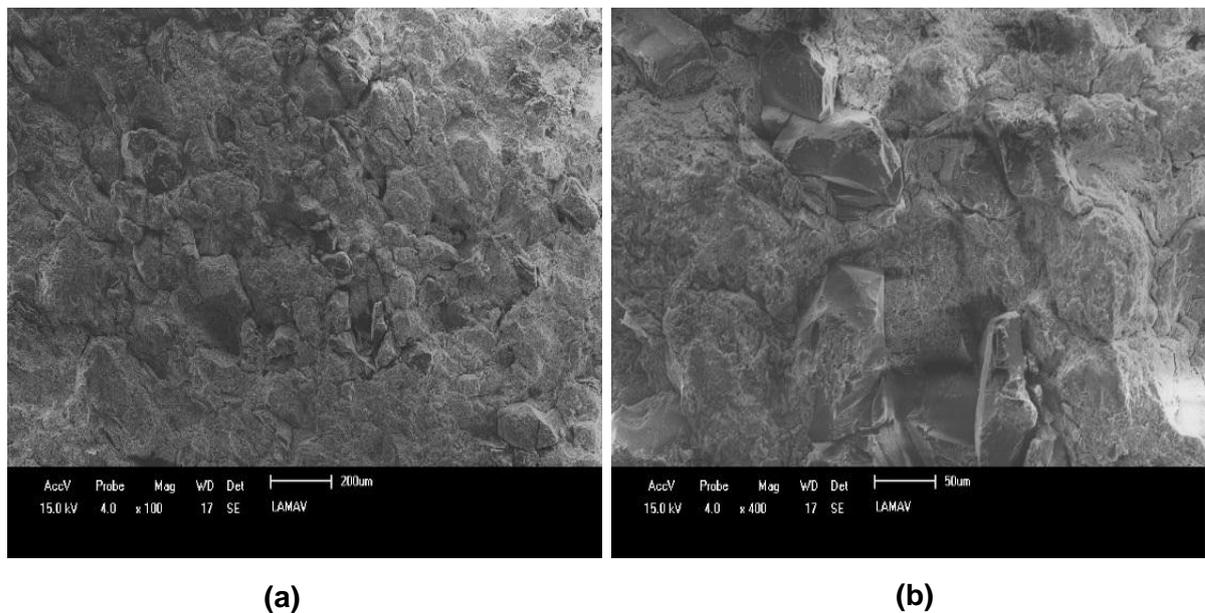
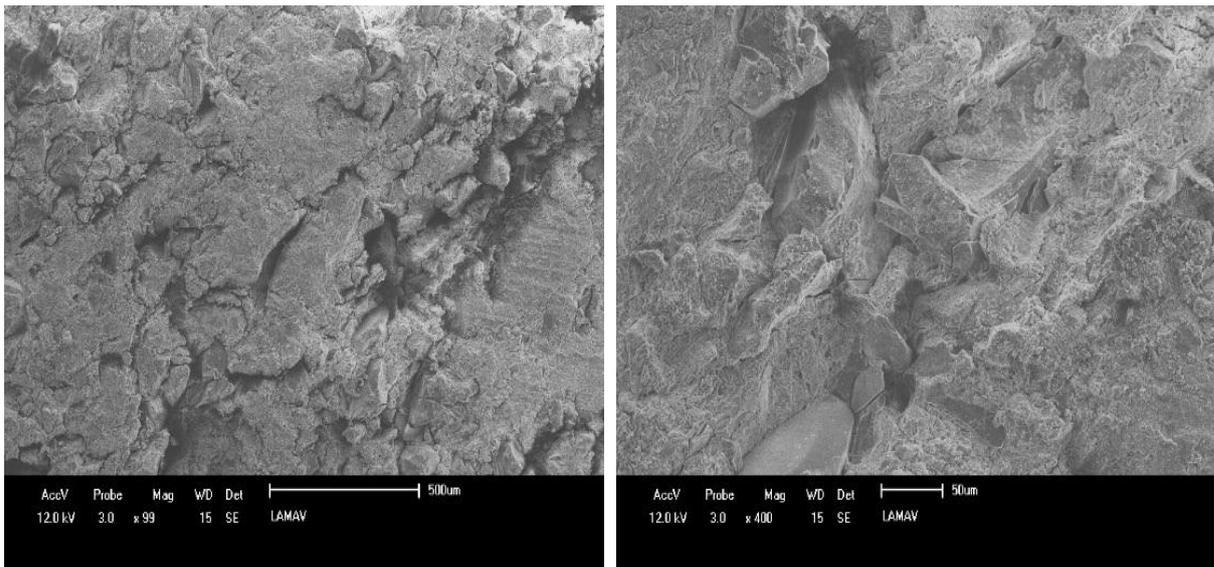


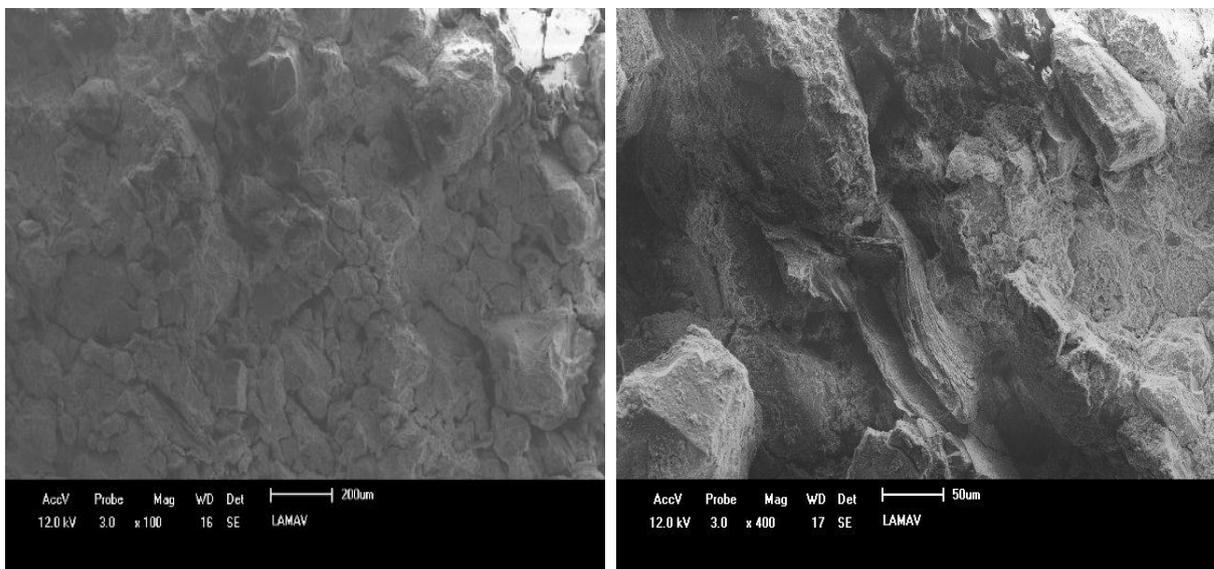
Figura 24. Microscopia eletrônica de varredura da argila com 0% de resíduo na temperatura de 1050°C com aumento de 100x (a) e de 400x (b.)



(a)

(b)

Figura 25. Microscopia eletrônica de varredura da argila com 5% de resíduo na temperatura de 850°C com aumento de 100x (a) e de 400x (b.)



(a)

(b)

Figura 26. Microscopia eletrônica de varredura da argila com 5% de resíduo na temperatura de 1050°C com aumento de 100x (a) e de 400x (b.)

#### 6.4.5. Caracterização Mineralógica da peça queimada

A Figura 27 apresenta o difratograma de raio X da cerâmica pura, queimada a 850 °C.

Nesta figura é possível observar que após queima houve a predominância de quartzo, feldspato potássio e mica. Nesta temperatura os picos de caulinita não são mais detectados, isto se dá devido à formação da fase amorfa, metacaulinita (SANTOS, 1989). A presença de mica e quartzo, são consideradas fases residuais, que estão presentes na matéria-prima em seu estado natural. A presença de feldspato potássio, é formado durante a queima da cerâmica, e são formados em temperaturas por volta de 700 °C, consequência da reação de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{K}_2\text{O}$  (CARTY e SENAPATI, 1998).

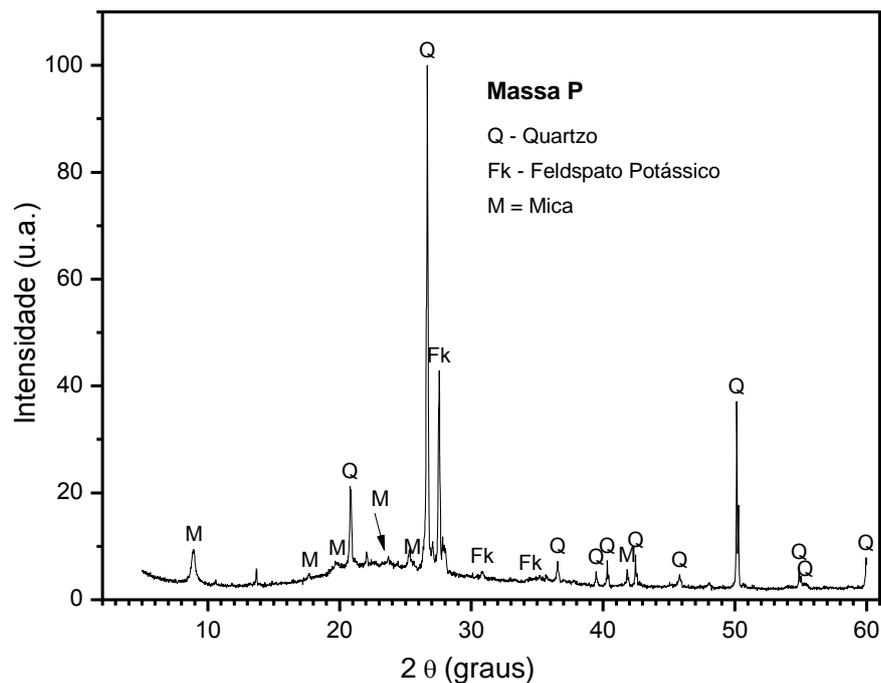


Figura 27. DRX da peça cerâmica pura queimada a 850 °C.

## 6.5. Levantamento econômico

A avaliação econômica preliminar da economia energética durante a etapa de queima da cerâmica, com a incorporação da biomassa em cerâmica vermelha foi abordada considerando os dados apresentados na Tabela 12.

A Tabela 12 apresenta o consumo específico dos principais tipos de fornos utilizados em cerâmica vermelha, considerações sobre o combustível utilizado e também sobre a biomassa. Destes fornos apresentados na Tabela 13, o forno Túnel é o mais econômico e moderno. Atualmente em Campos das 120 empresas de cerâmica vermelha, aproximadamente, somente uma está com este tipo de forno em funcionamento. Já o forno Hoffman, assim como o forno Túnel, funciona de modo contínuo, também apresentando um consumo específico bem inferior aos fornos que trabalham de modo intermitente, como o Garrafão. Este tipo de forno, embora não exista nas cerâmicas de Campos, está considerado neste trabalho porque apresenta uma concepção similar ao forno Abóboda, presente em cerca de 5 cerâmicas de Campos e utilizado para a fabricação de produtos de elevado valor agregado tais como revestimentos rústicos, tijolos maciços, adoquim, telhas, tijolos aparentes tipo cobogós.

Na Tabela 13, considerou-se a lenha como combustível que apresenta um poder calorífico de 2600 Kcal/kg (MÁS, 2002), como custo de R\$ 45,00/m<sup>3</sup>. Com relação à biomassa, observa-se que seu poder calorífico corresponde a 31,5% da lenha e considera-se o custo zero, ou seja, a empresa geradora do resíduo seria responsável pela secagem, trituração e transporte até a cerâmica. Estas atividades são geralmente menos onerosas que o encaminhamento da biomassa para aterro sanitário. Desta forma, a empresa geradora do resíduo também estaria obtendo redução de custo.

Para o balanço econômico, foi considerado um percentual de incorporação de biomassa de 2,5% em massa na cerâmica.

Tabela 12 – Dados para cálculo de balanço econômico durante a queima de produtos cerâmicos.

<b>Considerações do forno</b>	
<b>Forno</b>	<b>Consumo específico (kcal/ton)</b>
Garrafão	900000
Hoffmann	550000
Túnel	400000
<b>Considerações da lenha</b>	
Custo da biomassa (m <sup>3</sup> ) / (Kg)	(R\$) 45,00 / 0,11
Poder calorífico (kcal/kg)	2600
<b>Considerações da biomassa</b>	
Poder calorífico (kcal/kg)	819
Custo /Ton	(R\$) 0,00

### 6.5.1. Balanço econômico para o Forno Garrafão

Para a produção de uma tonelada de produto usando lenha como combustível, o Forno Garrafão gasta em média:

$$\left( \frac{\text{Consumo específico do forno (kcal/Ton)}}{\text{Poder calorífico da lenha (kcal/kg)}} \right) = \left( \frac{900000}{2600} \right) \Rightarrow 346,2 \text{ kg de lenha a } R\$ 0,11/\text{kg}, \text{ temos: } 346,2 \times 0,11 = R\$ 38,10$$

Com a incorporação de 2,5 % de resíduo, tem-se uma redução no consumo de energia do forno de:

$$(\text{Quantidade de resíduo (Kg)}) \times (\text{Poder calorífico (Kcal/kg)}) = 25 \times 819 = 20475 \text{ Kcal}$$

Com este dado, é possível calcular o percentual de energia economizado, durante a queima, que será de:

Calorias fornecidas pela biomassa / consumo específico do forno =  $20.475 / 900.000 = 2,3\%$ .

Entretanto, o calor teórico requerido para queimar 1 kg de argila é de 265 kcal. Isto mostra que a eficiência do forno garrafão é de cerca de 30,6%. Considerando que todo o calor gerado pelo resíduo de dentro da cerâmica seria aproveitado, a economia de lenha seria de:

Calorias necessárias de lenha para fornecer a correspondente energia proveniente da biomassa =  $100 \times 20.475 / 30,6 = 66.911 \text{ Kcal}$ .

Esta é a energia de fato economizada com a incorporação de 2,5% de biomassa na massa e corresponde a uma redução real de **7,4%** de energia proveniente da lenha ( $66.911 / 900.000$ ).

Em termos de custo, a redução de gasto com a lenha será de R\$ 2,82 / ton de cerâmica. Considerando que a Cerâmica Rodolfo Azevedo Gama, que usa forno Abóboda com 80 ton de carga e quatro queimas por mês, a economia será de R\$ 902 por mês. Não é um valor exorbitante, mas é equivalente ao lucro obtido com a venda de aproximadamente 7.000 tijolos maciços. Além disso, há a eventual redução de custo para a empresa geradora com a disposição final do resíduo, bem como a redução de material encaminhado para aterros, prolongando sua vida útil, e uma maior priorização de gerenciamento de resíduo, com a sua reutilização (Lei 12.305/2010). Por fim, a biomassa de fitorremediação, assim como a lenha, é um combustível renovável e praticamente neutraliza a emissão de CO<sub>2</sub>.

Seguindo o mesmo raciocínio usado anteriormente, foi calculado o percentual correspondente de economia energética durante a etapa de queima da cerâmica incorporada com 2,5% de biomassa para os outros tipos de fornos mencionados, Túnel e Hoffman. Nota-se na Tabela 13 que mesmo para fornos mais eficientes energeticamente, Hoffman com 48,2% e Túnel com 66,25%, a economia energética é praticamente a mesma, pois embora a energia necessária a ser fornecida de lenha para corresponder à energia fornecida seja menor, devido à melhor eficiência dos fornos, a energia total requerida também é menor.

A Tabela 13 apresenta o resumo dos resultados obtidos utilizando os três fornos para a queima da cerâmica. É possível observar que a incorporação da biomassa em cerâmica argilosa obteve resultados bastante atrativos em relação à economia de energia. Promovendo contribuição tanto para a indústria geradora da biomassa, que não vai ter problemas com a destinação final do mesmo, quanto para

a indústria de cerâmica, que ao incorporar o mesmo, obtém reduções significativas com gastos de energia.

Tabela 13– Resumos dos resultados de economia energética por tipo de forno durante a etapa de queima de cerâmica com a incorporação de biomassa.

<b>Economia energética</b>			
<b>Quantidade de biomassa incorporada à massa argilosa (% em massa)</b>	<b>Forno Garrafão</b>	<b>Forno Hoffmann</b>	<b>Forno Túnel</b>
<b>2,5</b>	<b>7,4</b>	<b>7,7</b>	<b>7,7</b>

## 7. CONCLUSÕES

A cerâmica vermelha pode se constituir como uma alternativa ambientalmente adequada para a disposição final de biomassa utilizada para fitorremediação. A alternativa de disposição da biomassa em aterro industrial é possivelmente mais onerosa que a disponibilidade da biomassa seca e triturada às indústrias cerâmicas de Campos dos Goytacazes ou mais próximas às indústrias geradoras.

Questões ambientais importantes como as emissões atmosféricas e lixiviação e solubilização da cerâmica ainda precisam ser avaliadas. Entretanto, devido ao baixo teor de biomassa recomendada à incorporação, não deve ocorrer impacto negativo significativo nestas análises. De qualquer forma, são questões que serão avaliadas na sequência deste estudo.

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, é possível concluir que:

A incorporação da biomassa de *S. auriculata* de fitorremediação de efluentes líquidos na produção de cerâmica vermelha é uma alternativa como destino sustentável e de possível realização, visto que a quantidade deve ser de forma prudente, para não prejudicar as propriedades da cerâmica.

A análise de DSC da biomassa mostrou que com o aumento da temperatura ocorreu uma perda de massa de 65%, decorrente da combustão da matéria orgânica., e a energia liberada nesta reação pode contribuir para uma redução do gasto energético durante a queima da cerâmica.

A quantidade deve ser avaliada, para não prejudicar a plasticidade da massa, o que levaria a uma maior quantidade de água para conformação da peça, gastando mais energia no momento da secagem, causando ainda defeitos nas peças. Nos testes de plasticidade, apenas as massas contendo 2,5 e 5% de biomassa ficaram localizadas na região de extrusão aceitável.

Com os resultados, pode-se observar que até 2,5% de biomassa pode ser incorporado a massa, atendendo as normas para AA para a produção de telha e blocos cerâmicos. Para blocos de vedação, apenas a composição de 2,5% quando queimadas em temperaturas superiores a 850 °C atenderam os valores exigidos, sendo que a 1050 °C, com a porcentagem de 2,5 % atenderam as exigências para telhas, e 5 %, para bloco de vedação.

A densidade aparente das peças secas mostrou que não houve uma redução da densidade. Nas peças queimadas, a densidade foi prejudicada a medida que se aumentou a quantidade de biomassa incorporada, decorrente da perda de massa durante a queima. Quando avaliado por temperatura, estatisticamente não houve uma redução nas temperaturas avaliadas.

O teste de resistência mecânica das peças com o incremento de biomassa, mostrou que as peças queimadas atenderiam o mínimo sugerido por Santos (1989) para blocos vedação (2MPa), exceto com porcentagens de 7,5 e 10%, queimadas em 750° °C.

Ao analisar as microestruturas das peças foi possível analisar que a maior quantidade de biomassa acrescida à cerâmica proporcionou uma maior rugosidade às peças, acarretando então em uma maior AA.

No DRX da peça queimada a 850 °C foram encontrados pico de quartzo, mica e feldspato potássio, sendo a mica e o quartzo impurezas da argila em seu estado natural, e o feldspato potássio, possivelmente devido a transformações durante a queima.

Foi feito ainda um levantamento de economia energética durante a queima da cerâmica, com a incorporação de biomassa, onde foi possível avaliar que levando em consideração o custo zero do resíduo, nas cerâmicas com incorporação de 2,5% de biomassa, ocorreria uma redução significativa do gasto de energia.

## **8. SUGESTÕES**

- Analise ambiental das peças queimadas (lixiviação e solubilização);
- Investigar prováveis gases que podem ser liberados durante a etapa de queima da cerâmica.
- Realizar testes industriais com as formulações estudadas em escala laboratorial que atenderam as normas.

## REFERÊNCIAS

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 15310 - **Componentes Cerâmicos – Telhas – Terminologia, requisitos e métodos de ensaio**, (2009).

\_\_\_\_\_NBR 15270-1 Componentes cerâmicos. Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação – Terminologia e requisitos, 2005

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

\_\_\_\_\_ NBR 7171 - bloco cerâmico para alvenaria. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_ NBR 6459. Solo - Determinação do limite de liquidez, 1984.

\_\_\_\_\_ NBR 7180. Solo - Determinação do Limite de plasticidade, 1984.

\_\_\_\_\_. NBR 7170: tijolo maciço para alvenaria. Rio de Janeiro, 1983.

Accioly, A.M.A.; Siqueira, J.O. Contaminação Química E Biorremediação Do Solo. In: Novais, R.F.; Alvarez, V.H.; Schaefer, C.E.G.R. Tópicos Em Ciência Do Solo. Viçosa: Sociedade Brasileira De Ciência Do Solo, 2000.

Abajo, M. F. Manual sobre fabricación de baldosas. Tejas y ladrillos. Ed. BELAMAR S.A. Espanha. Application in quality control. Tili e Brick Int. v.6, n.4, p 21 -23, 2000.

Albuquerque, F. P. Confecção De Blocos Cerâmicos Com Incorporação De Biomassa Contaminada Por Cobre. Trabalho De Conclusão De Curso (Bacharel Em Engenharia Ambiental) Campo Mourão, 2012.

Albuquerque, F. P.; Lima, S. B.; Souza, D. C.; Oliveira, D. L. A. Incorporação De Biomassa Vegetal Na Produção De Blocos Cerâmicos. In: Congresso Brasileiro De Engenharia Sanitária E Ambiental, 26. 2011.

Albuquerque, F. P., Sedoski, M. C., Lima, S. B., Souza, D. C., Oliveira, D. L. A. Reaproveitamento De Biomassa De *Salvinia Auriculata* Albert. Na Produção De Blocos Cerâmicos In: 2º Congresso Internacional De Tecnologia Para O Meio Ambiente, Bento Gonçalves – Rs, 2010.

Almeida, A.A.F De, Valle, R.R., Mielke, M.S., Gomes, F.P. Tolerance And Prospection Of Phytoremediator Wood Species Of Cd, Pb, Cu Andr. Braz. J. Plant Physiol. Londrina, v.19,2,p 98, 2007.

Alexandre, J. ANÁLISE DE MATÉRIA-PRIMA E COMPOSIÇÕES DE MASSA UTILIZADA EM CERÂMICAS VERMELHAS. Tese de Doutorado em Ciências de Engenharia. Universidade Estadual do Norte Fluminense, UENF, LECIV – Campos dos Goytacazes, RJ, 174p – 2000.

Andrade, J. C.Da M. E; Tavares, S.R.De L.; Mahler, C.F., Fitorremediação: O Uso De Plantas Na Melhoria Da Qualidade Ambiental. Oficina De Texto. 173p, 2013.

Astm- American Society For Testing And Materials (1977a) Test Method For Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity And Apparent Specific Gravity Of Fired Whiteware Products. C373-72.

Benavides, M. P.; Galego, S.M.; Tomaro, M;L. Toxicidade de cádmio em plantas. Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal, v. 17, n1, p 21-34, 2005.

Bezerra, T.P., Silva, C.P Da, Lopes, J.P (2007) Utilização Da Macrófita Aquática Eeria Densa Planchon, 1984 ( Hydrocharitacea) Na Produção De Tijolo Para Construção Civil. Revista Brasileira De Engenharia De Pesca 2(1).

Braga, B.; Hespanhol, I.; Conejo, J. G. L.; Barros, M. T. L. De; Spencer, M.; Porto, M.; Nucci, N.; Juliano, N.; Eiger, S. Introdução a engenharia ambiental. São Paulo: Prentice Hall, 305 P.

Baker, A. J. M ; Brooks, R.R . Terrestrial higher plants hyperaccumulate metallic element, A review of their distribution. *Ecol. Phytochem. Biorecovery* , v. 1, p. 81-126, 1989.

Brasil - Conselho Nacional Do Meio Ambiente. Resolução Nº 357 de 17 de março de 2005. trata das condições e padrões de lançamento de efluentes. *Diário Oficial Da República Federativa Do Brasil, Brasília, 2005.*

Bonet, I. I. Valorização do Resíduo Areia de Fundição (RAF). Incorporação nas Massas Asfálticas do Tipo C.B.U.Q. Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia.

Bortolotto, I. M.; Neto, G. G. O Uso Do Camalote, *Eichhornia Crassipes* (Mart.) Solms, Pontederiaceae, Para Confecção De Artesanato No Distrito De Albuquerque Corumbá, Ms, Brasil. *Acta Botanica Brasileira*, v.19, n.2, p.331-337, 2005.

Bueno, R. F. Fiore, F. A. Victoretti, M. Inácio, A. R. Capellari, B. Chagas, R. K. Implantação de wetlands construídas em escala real para o tratamento de esgoto sanitário em residências da barra do ribeira no município de Iguape – São Paulo. *revista saúde, meio ambiente e sustentabilidade, São Paulo, V. 8, N. 2, P.1-17, 2013.*

Carty, W. M., Senapati, U., "Porcelain-Raw materials, processing, phase evolution, and mechanical behavior", *Journal of the American Ceramic Society*, v. 81, pp. 1-18, 1998.

Calfa, B.A.; Torem, M.L. (2007) Biorreagentes: Aplicações na remoção de metais pesados contidos em efluentes líquidos por biossorção/ bioflotação. *Revista Escola De Minas*, v. 60, 3, 537-542, 2007.

Campos, J.C., Ferreira, J.A., Mannarino, C.F., Silva, H.R. & Borba, S.M.P. Tratamento Do Chorume Do Aterro Sanitário De Piraí (Rj) Utilizando Wetlands. In: VI Simpósio Ítalo Brasileiro De Engenharia Sanitária E Ambiental, Anais, Vitória-Es: Associação Brasileira De Engenharia Sanitária E Ambiental, 2002.

Castro, R. M. Estudo comparativo das perdas d'água em mesocosmos colonizados ou não por aguapé (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms- Laurbach . 2008. 77 f. Dissertação – Faculdade de Ciências Agronomicas da UNESP – Campus Botucatu, Universidade Estadual Paulista, SP.

Clemens, s. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie*, v.88, p.1707 – 1729, 2006;

Cheng, S., Grosse, W., Karrenbrock, F., Thoennesen, M. Efficiency Of Constructed Wetlands In Decontamination Of Water Polluted By Heavy Metals, *Ecological Engineering*, Volume 18, Issue 3, 317-325, 2002.

Costa , C. R ; Olivi, P. Botta, C. M.R.; Espindola, E.L.G. A toxicidade em ambiente aquático: Discussão e método de avaliação. *Química nova*, v.31, n 7, p 1820 – 1830, 2008c

Costa, S. M. P. Da. (2004) Avaliação do potencial de plantas nativas do Brasil no tratamento de esgoto doméstico e efluentes industriais em “wetlands construídos”. 119 f. tese (doutorado)-universidade estadual de campinas. departamento de engenharia química, área de processos químicos e informática. Campinas, Sp., 2004

Coutinho, H. D.; Barbosa, A. R. Fitorremediação: Considerações Gerais E Características De Utilização. *Silva Lusitana*, v. 15, 1, 103-117, 2007.

Cornejo, J.J., Munoz, F.G. (1997) Evaluación De Espécies De La Flora Chilena Como Agente De Descontaminación De Aire Interiores. Santiago. Universidad De Santiago De Chile.

Cunha -Santino, M. B.; Bianchini Jr, I. Consumo de oxigênio e estequiometria da decomposição aeróbica de *Utricularia breviscapa* Wright ex Griseb e *Salvinia auriculata* Aubl. 189- 203.I: J.. santos, J.S. Pires e L.E. Moschini (eds.), Estudos Integrados em ecosistemas – estação coólgica de Jataí. V 4, EdUFSCAR, São Carlos – SP, 2006b, 417p.

Cunningham, S.D. & Ow, D.W. Promises And Prospects Of Phytoremediation. *Plant Physiology*, 110, 715-719, 1996.

Dinardi, A. L.; Formagi, V. M.; Coneglian, C. M. R.; Brito, N. N.; Dragoni Sobrinho, G.; Tonso, S.; Pelegrini, R. Fitorremediação. In: Iii Fórum De Estudos Contábeis, Limeira. **Anais...** Limeira: Centro Superior De Educação Tecnológica (Ceset) E Curso De Tecnologia Em Saneamento Ambiental - Laboratório De Pesquisas Ambientais – Unicamp, 2003, 1 – 15, 2003.

Domingos, V.D., Boaro, C. S. F., Cataneo, A. C., Lobo, T. F., Martins, D. Efeito do cobre na atividade da enzima pirogalol peroxidase em plantas de 105 *Myriophyllum aquaticum* cultivadas em solução nutritiva. *Planta Daninha*, V. 23, 2, 375-380, 2005.

Dondi, M.; Marsigli, M.; Fabbri, B. (1997) Recycling Of Individual And Urban Wastes In Brick Production – A Review. *Tile & Brick International*, Germany, V. 13, P. 218-225, 1997.

Esteves, F.A. Fundamentos De Limnologia. Interciência. 2ª Ed., Rio De Janeiro, 602p, 1998.

Esteves, F.A. Fundamentos De Limnologia. 1ª Ed, Rio De Janeiro: Editora Interciência. 1988,574p.

Ferreira, I.J.M., Lima, S.B., Souza, D.C.De; Carvalho, K.Q. Reaproveitamento De Biomassa Seca De *Eleocharis* Spp. Na Produção De Blocos Cerâmicos. In: Seminário De Iniciação Científica E Tecnológica Da Utfpr. Curitiba, 2012.

Forno, I.W.; Harley, K.L.S. The Occurrence Of *Salvinia molesta* In Brazil. *Aquatic Botany*, v.6, p. 185-187, 1979.

Garcia, E., Cabral Jr, Marsis, Quarcioni, V.A., Chotoli, F. F (2014) Resíduo De Cerâmica Vermelha (Rcv): Uma Alternativa Como Material Pozolânico . *Cerâmica Industrial* 19, 4. 31 -38.

Hardoin, P. C.; Gonçalves, A. D. Avaliação Do Potencial Do Emprego Do Biogás Nos Equipamentos Utilizados Em Sistemas De Produção De Leite. Enc. Energ. Meio Rural, 2003.

Henry-Silva, G. G.; Camargo, A. F. M. Tratamento De Efluentes De Carcinicultura Por Macrófitas Aquáticas Flutuantes. Revista Brasileira De Zootecnia, v.37, n. 2, p.181-188, 2008.

Henry-Silva, G. G.; Camargo, A. F. M. Composição Química De Macrófitas Aquáticas Flutuantes Utilizadas No Tratamento De Efluentes De Aquicultura. Planta Daninha, v.24, n.1, p. 21-28, 2006.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. IBGE. <http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=330100>. Acessado em: 13 de maio de 2016.

Joyce, J.C. Practical uses of aquatic weeds. In: Pieterse, A. H.; Murphy, K. J. (Eds). Aquatic weeds. The ecology and management of nuisance aquatic vegetation. Oxford: Oxford University Press, 1993. p. 274-291.

Kadlec, r.; wallace, S.D. Treatment wetlands. Boca Raton: Lewis Publishers. 1016 p. 2009.

Lamego, A. R. O. "Homem e o Brejo". 2ª ed., Editora Lidador Ltda, Rio de Janeiro, 1974, 230p.

Laws, E.A., 1993, "Aquatic Pollution", An Introductory Text. 2nd Ed. New York, Interscience. 611 Pp.

Lewis, M.A. (1995) Use Of Freshwater Plants For Phytotoxicity Testing: A Review. Environmental Pollution, 87, 1993, p319-336.

Liu, H., Li, W., Dissolved trace elements and heavy metals from the shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River region. China Environ. Earth Sci. 62, 1503–1511, 2011.

Liu, W., Zhang, Q., Liu, G., Lake eutrophication associated with geographic location, lake morphology and climate in China. *Hydrobiologia* 644, 289–299, 2010.

Locastro, J.K. Incorporação De Tecidos Vegetais Contaminados Por Cromo Em Blocos Cerâmicos. (Trabalho De Conclusão De Curso Engenharia Ambiental - Ufp). Campo Mourão, 2014.

Macedo, R.S.; Menezes, R.R.; Neves, G.A.; Ferreira, H.C. Estudo de argilas usadas em cerâmica vermelha. *Cerâmica* 54, 411 – 417, 2008.

Marsigli, M.; Dondi, M. L'industria Dei Laterizi 46 214-222, 1997.

Martins, D. F. F. Estudo integrado do potencial fitorremediados de *Eichornia crassipes* em ambientes naturais e sua utilização para obtenção de extrato proteico. Tese de doutorado, programa de pós-graduação em química. 164 f, 2014. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. RN

Más, E. Qualidade e tecnologia em cerâmica vermelha. São Paulo: Editora Pólo Produções Ltda, 2002.

Menezes, R.R.; Neves, G. A.; Ferreira, H. C. Argilas plásticas do tipo “Ball Clay”, *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v. 9, n. 3 118–124, 2014.

Ministério de Minas e energia (MME). <http://www.mme.gov.br/>: Acessado em: 09/05/2016.

Ministério Do Meio Ambiente (Mma) (2015) Disponível Em: <Http://Www.Mma.Gov.Br/Clima/Energia/Energias-Renovaveis/Biomassa> : Acessado Em 20/04/2015.

Mishima, D., Tateda, M., Ike, I. Fujita, M. Comparative study on chemical pretreatments to accelerate enzymatic hydrolysis of aquatic macrophyte biomass used in water purification processes. *Bioresource Tecnology*. v. 97, 2166-2172, 2007.

Monteiro, S. N.; Vieira, C. M. F. *Tile and Brick*, v. 18, n. 3, p 152 – 157, 2002.

Monteiro, S. N.; Vieira, C. M. F. Influence of firing temperature on the ceramics properties of clays from Campos dos Goytacazes, Brazil. *Applied Clay Science*, v. 27, p. 229 – 334, 2004.

Monteiro, S. N.; Soares, R.; Vieira, C. M. F. Comparison of roofing tile clay ceramic bodies from Campos dos Goytacazes, Brazil. *Silicate Industriels*, v. 69, n. 11-12, p. 103-109, 2004.

Naime, R.; Garcia, A. C., Utilização de enraizadas no tratamento de efluentes agroindustriais. *estudos tecnológico*, v.1, 2, 9-20, 2005.

Norton, F. H. *Introdução à tecnologia cerâmica*. São Paulo: Edgard Blücher, 1973, 325p.

Oliveira, E. M. S.; Sampaio, V. G.; Holanda, J. N. F. Incorporação de resíduo de ETAs em cerâmica vermelha. In: 17º Congresso Brasileiro De Engenharia E Ciência Dos Materiais. Foz Do Iguaçu – Pr, 11, 2006

Oliveira, E. M. S.; Machado, S. Q.; Holanda, J. N. F. Caracterização De Resíduo (Lodo) Proveniente De Estação De Tratamento De Águas Visando A Sua Utilização Em Cerâmica Vermelha. *Revista Cerâmica Industrial (Abceram)*, Nº 50, P. 324-330, 2004.

Outridge, P.M.; Hutchinson, T.C., 1990. Effects of cadmium on integration and resource allocation in the clonal fern *Salvinia molesta*. *Oecologia*, vol. 84, no. 2, p. 215-223, 1990.

Peixoto, P.H.P., Pimenta, D.S, Antunes, F. Efeito Do Flúor Em Folhas De Plantas Aquáticas De *Salvinia Auriculata*. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 40. n.8, p.727-734, 2005.

Peret, A. M ; Bianchini Jr, I. Stoichiometry of aerobic mineralization (O/C) of aquatic macrophytes leachate from a tropical lagoon , Sao Paulo. *Hidrobiologia*, 528,167 – 178, 2004.

Pires, F.R., Souza, C.M., Silva, A.A., Queiroz, M.E.I.R., Procópio, S.O., Santos, J.B., Santos, E.A., Cecon, P.R., seleção de plantas com potencial de fitorremediação de tebuthionon. *Planta Daninha* v.21, n.3, 2003.

Pitelli, R. L. C. M. Toffaneli, C.M.; Vieira, E.A.; Pitelli, R.A.; Velini, E.D. dinâmica da comunidade de macrófitas aquáticas no reservatório de santana, Rj. *Planta Daninha*, v. 26, n. 3, p. 473-480, 2008.

Pitelli, R.; Nachtigal, G. F.; Pitelli, R. L. C. M. Controle Biológico De Plantas Daninhas. In: Manzanillo: Congreso Latinoamericano De Malezas. P.518- 524, 2003.

Pilosi, B.T., Lima, L.K.S., Vieira, M.G.A. (2014) Caracterização Da Macrófita Aquática *Salvinia Cucullata* Empregada Na Bioadsorção Do Corante Sintético Ácido Laranja 7. In. X Congresso Brasileiro De Engenharia Química. Blucher Chemical Engineering Proceedings Vol.1, N°1.

Política Nacional De Resíduos Sólidos (PNRS). Lei nº 12.305/10 Disponível Em [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm) Acessado Em: 05/05/2016.

Pompêo, M. Monitoramento E Manejo De Macrófitas Aquáticas. *Oecol. Bras.*, V. 12, 3, 406 -424,2008.

Pompêo, M.L.M. & Moschini-Carlos, V. Macrófitas Aquáticas E Perifíton: Aspectos Ecológicos E Metodológicos. São Carlos: Ed. Rima, 2003.

Pompêo, M.L.M. *As Macrófitas Aquáticas*, 2001.

Pott, V.J. e Pott, A. *Plantas aquáticas do Pantanal*. Brasília, Embrapa, 2000. 404 p.

Ramos, I. S. Delimitação, caracterização e cubagem da região de exploração de argilas no município de Campos dos Goytacazes. 2000.Dissertação (Mestrado em Ciência de Engenharia- Campos dos Goytacazes-RJ, UENF.

Reis, L. B.; Silveira, S. Energia elétrica para o desenvolvimento sustentável: introdução de uma visão multidisciplinar. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2000, 284p

Ribeiro, C. G.; Correia, M.G.; Ferreira, L. G, Gonçalves, A. M.; Ribeiro, M. J. p.; Ferreira, A. A. L. Estudo sobre a influência da matéria orgânica na plasticidade e no comportamento térmico de uma argila. Cerâmica Estrutural, 9, 3, 2004.

Santos, P. S. Ciência e Tecnologia das Argilas. 2. ed. São Paulo, SP: Edgard Blücher, 1989. 408.91p.

Salati, Enéas . Controle De Qualidade Da Água Através De Sistemas De Wetlands Contruídos. Fbds - Fundação Brasileira Para O Desenvolvimento Sustentável, Rio De Janeiro, 19f, 2011.

SALATI, E. Controle de Qualidade da água através de Sistemas de Wetlands Contruídos. 19 f. FBDS - Fundação Brasileira Para O Desenvolvimento Sustentável, Rio de Janeiro, 2011

Salati, E; Salati Filho, E.; Salati, E. Utilização De Sistemas De Wetlands Construídas Para Tratamento De Águas. Instituto Terramax - Consultoria E Projetos Ambientais Ltda, Piracicaba, 2009.

Salati, E , Rodrigues, N S. De Poluentes A Nutrientes, A Descoberta Do Aguapé. Revista Brasileira Da Tecnologia, 13(3) : 37-42, 1982.

Sezerino, P. H. Potencialidade Dos Filtros Plantados Com Macrófitas (Constructed Wetlands) No Pós-tratamento De Lagoas De Estabilização Sob Condições De Clima Subtropical. Tese (Doutorado Em Engenharia Sanitária E Ambiental) - Universidade Federal De Santa Catarina. Florianópolis,p.171, 2006.

Souza, G. P.; Souza, S. J. G.; Terrones, L. A. H.; Holanda, J. N. F. Análise mineralógica de argilas sedimentares brasileiras usadas em cerâmica vermelha. Cerâmica, v. 51, p. 382 – 387, 2005.

Tavares, S. R. L., Oliveira, S.A, Salgado, C.M. Avaliação De Espécies Vegetais Na Fitorremediação De Solos Contaminados Por Metais Pesados. *Holos*, 29, v. 5, 2013.

Thomaz, S.M. (2002) Fatores Ecológicos Associados À Colonização E Ao Desenvolvimento De Macrófitas Aquáticas E Desafios De Manejo. *Planta Daninha*, Viçosa, v.20, p. 21-33, 2002.

Verma, V.K.; Tewari, S.; Rai, J.P.N. Ion Exchange During Heavy Metal Biosorption From Aqueous Solution By Dried Biomass Of Macrophytes. *Bioresource Technology*, v. 99, 1932–1938,2008.

Vieira, C.M.F, Pinheiro, R.M. Avaliação De Argilas Cauliníticas De Campos Dos Goytacazes Utilizadas Para Fabricação De Cerâmica Vermelha. *Cerâmica* 57, 319-323, 2012.

Vieira, C. M. F.; Pinheiro, R. M. Avaliação de Argilas Cauliníticas de Campos dos Goytacazes Utilizadas para Fabricação de Cerâmica Vermelha. *Cerâmica*, v. 57, p. 319-323, 2011.

Vieira, C.M.F, Soares, J.B., Monteiro, S.N. (2008c) Desenvolvimento De Massas De Revestimento Cerâmico Com Argila Caulinítica E Nefelina Sienito. *Cerâmica* 54 ,184-192, 2008.

Vieira, C. M. F., Sánchez, R., Monteiro, S. N. Characteristics of clays and properties of building ceramics in the state of Rio de Janeiro, Brazil. *Construction and building materials*, v. 22, p. 781 – 787, 2008.

Vieira, C. M. F. ; Borlini, M. C. ; Monteiro, S.N. Characterization Of Clayey Ceramic Incorporated With Eucalyptus Firewood Ash. In: *Tms 2007 - 136th Annual Meeting & Exhibition*, Orlando. In: *Tms 2007 - 136th Annual Meeting & Exhibition*. Warrendale, Pa : The Minerals, Metals & Materials Society. V. 1. P. 180-180.

Vieira, C. M. F.; Monteiro, S. N. (2006). Cerâmica Argilosa Incorporada Com Resíduo Oleoso Proveniente Do Setor Petrolífero. *Revista Matéria*, V. 11, N. 3, Pp. 217 – 222.

Vieira, C. M. F.; Souza, E. T. A.; Monteiro, S. N. Efeito da Incorporação de chamote de tijolos na microestrutura de telhas cerâmicas. Anais do 59º Congresso Anual da ABM, São Paulo, SP, 2004. p. 1462-1469.

Vieira, C. M. F.; Feitosa, Hygina S.; Monteiro, S. N. Avaliação da secagem de cerâmica vermelha através da curva de Bigot. Revista Cerâmica Industrial, v. 8, n. 2, p. 42-46, 2003.

Vieira, C. M. F. Caracterização das argilas de Campos dos Goytacazes visando à fabricação de revestimento cerâmico semiporoso. 2001. 126 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro - Campos dos Goytacazes.

Vieira, C. M. F.; Holanda, J. N. F.; Pinatti, D. G. Caracterização de massa cerâmica vermelha utilizada na fabricação de tijolos na região de Campos dos Goytacazes – RJ. Cerâmica, v. 46, p. 14 – 17, 2000.

Vymazal, J.; Kröpfelová, L. Wastewater Treatment In Constructed Wetlands With Horizontal Sub-Surface Flow. Springer, 2008.

Volesky, B, Weber, J.M Continuous-Flow Metal Biosorption In Regenerable Sargassum Column. Water Research, v.7,p.297-306, 2003.

Williams, R H. *Salvinia ariculata* Aubl. The chemical eradication of a noxious aquatic weed in eylon. Tropical Ariculture Trinidad, 33, 145-157, 1956.

Wnag, Z; Yao, L; Guihua, L.; Wenzhi, L. Heavy metals in water, sediments and submerged macrophytes in ponds around the Dianchi Lake, China, 2014.

Wolff, G.; Pereira, G.C. ; Castro, E.M.; Louzada, J. Coelho, F.F. The use of *Salvinia auriculata* as a bioindicator in aquatic ecosystems: biomass and structure dependent on the cadmium concentration, São Carlos – SP, Braz. J. Biol. v. 72 n.1, 2012.

Zhou, Q. A, Zhang, J., FU, J., SHI, J., Jiang, G., 2008. Biomonitoramento: uma ferramenta atraente para avaliação da poluição por metais no ecossistema aquático. *Analytica Chimica Acta* , vol. 606, n. 2, p.135 – 150, 2008.