

NAYARA VILELA AVELAR

**POTENCIAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DA INDÚSTRIA TÊXTIL PARA  
FINS ENERGÉTICOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para a obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2012

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

A948p  
2012

Avelar, Nayara Vilela, 1986-

Potencial dos resíduos sólidos da indústria têxtil para fins energéticos / Nayara Vilela Avelar. – Viçosa, MG, 2012. xii, 71f. : il. ; (algumas color.) ; 29cm.

Inclui anexos.

Orientador: Ana Augusta Passos Rezende.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Resíduos industriais. 2. Lodo. 3. Briquetes. 4. Indústria têxtil. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22. ed. 628.44

NAYARA VILELA AVELAR


**POTENCIAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DA INDÚSTRIA TÊXTIL PARA  
FINS ENERGÉTICOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 22 de outubro de 2012

  
\_\_\_\_\_  
Angélica de Cássia Oliveira Carneiro  
(Coorientadora)

  
\_\_\_\_\_  
Luciano Miguel Moreira dos Santos

  
\_\_\_\_\_  
Ana Augusta Passos Rezende  
(Orientadora)

  
\_\_\_\_\_  
Solange de Oliveira Araújo

**À minha mãe, Liliane Maia Vilela Avelar.  
Ao meu pai, Antônio Tadeu Lopes Avelar.**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pelo dom da vida e da sabedoria.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, pela oportunidade de realizar este curso.

À professora Ana Augusta, pela amizade e orientação.

Aos professores Angélica de Cássia e Cláudio Mudado, e à doutoranda Marina, pela ajuda e pelos aconselhamentos durante a realização deste trabalho.

Às equipes dos laboratórios de Energia da Madeira e de Meio Ambiente, que disponibilizaram parte do seu tempo e sua experiência na área.

À CAPES, pela concessão de bolsa de estudos.

Aos meus amigos que, em momentos distintos, estiveram presentes.

À minha família e ao meu namorado, pelo grande e contínuo apoio no meu dia a dia e no conquistar de novos horizontes.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	vii
LISTA DE TABELAS .....	viii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	x
RESUMO .....	xi
ABSTRACT .....	xii
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	1
2. CAPÍTULO 1: REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1    Processo Produtvo .....	3
2.1.1    Fiação .....	4
2.1.2    Tecelagem/Malharia.....	5
2.1.3    Beneficiamento têxtil .....	5
2.1.4    Confecção.....	6
2.2    Geração de Resíduos .....	6
2.3    Tratamento de Efluentes e Geração de Lodo .....	10
2.4    Tratamento do Lodo .....	11
2.4.1    Adensamento.....	11
2.4.2    Desaguamento .....	12
2.4.3    Condicionamento .....	13
2.4.4    Estabilização .....	14
2.4.5    Secagem térmica .....	15
2.4.6    Oxidação úmida .....	16
2.4.7    Pasteurização.....	17
2.4.8    Incineração .....	17
2.4.9    Pirólise .....	19
2.4.10    Gaseificação .....	20
2.5    Densificação .....	20
2.5.1    Briquetagem .....	21
2.5.2    Principais propriedades dos briquetes.....	22
2.5.3    Vantagens e desvantagens do uso de briquetes.....	23
2.6    Companhia Industrial Cataguases .....	23
2.5.1    Processo produtivo da Companhia Industrial Cataguases .....	24
2.5.2    Geração de resíduos na Companhia Industrial Cataguases.....	25

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	28
3. CAPÍTULO 2: CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DA INDÚSTRIA TÊXTIL PARA GERAÇÃO DE ENERGIA.....	34
RESUMO .....	34
ABSTRACT.....	35
3.1 Introdução.....	36
3.2 Material e Métodos.....	37
3.2.1 Classificação e caracterização dos resíduos.....	37
3.3.2 Classificação das cinzas .....	39
3.3 Resultados e Discussão .....	39
3.3.1 Classificação dos resíduos.....	39
3.3.2 Propriedades físicas e químicas dos resíduos.....	40
3.3.3 Classificação das cinzas .....	44
3.3 CONCLUSÕES.....	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46
4. CAPÍTULO 3: PRODUÇÃO DE BRIQUETES A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA INDÚSTRIA TÊXTIL PARA FINS ENERGÉTICOS.....	49
RESUMO .....	49
ABSTRACT.....	50
4.1 Introdução.....	51
4.2 Material e Métodos.....	52
4.2.1 Produção dos briquete .....	52
4.2.2 Propriedades dos briquetes.....	55
4.2.3 Delineamento experimental .....	56
4.3 Resultados e Discussão .....	56
4.3 CONCLUSÕES.....	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64
5. CONCLUSÕES GERAIS.....	66
ANEXO 1: ENSAIOS DE LIXIVIAÇÃO E SOLUBILIZAÇÃO DOS RESÍDUOS....	68
ANEXO 2: ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO DAS CINZAS.....	69
ANEXO 3: PROPRIEDADES QUÍMICAS, FÍSICAS E MECÂNICAS DOS BRIQUETES.....	70
ANEXO 4: RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (TESTE F). .....	71

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Cadeia produtiva têxtil e de confecções... ..	4
Figura 2.2 – Fluxograma do processo produtivo da indústria têxtil e as etapas de geração de resíduos.....	8
Figura 2.3 – Localização do município de Cataguases.....	24
Figura 2.4 – O processo produtivo e a geração de resíduos na Companhia Industrial Cataguases.....	25
Figura 2.5 – Fluxograma da estação de tratamento de efluentes. ....	26
Figura 2.6 – Estação de tratamento de efluentes.....	27
Figura 3.1 – Resíduos estudados.....	37
Figura 4.1 – Briquetadeira laboratorial e características da matriz da briquetadeira.....	53
Figura 4.2 – Briquetes produzidos com a mistura dos resíduos em cinco percentagens de lodo biológico e resíduo de algodão e três pressões diferentes.....	54
Figura 4.3 – Aparência visual dos briquetes produzidos. ....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Resumo dos poluentes emitidos durante o processamento têxtil. ....	9
Tabela 3.1 – Umidade dos resíduos, lodo biológico e resíduo de algodão. ....	40
Tabela 3.2 – Composição química elementar dos resíduos da indústria têxtil. ....	40
Tabela 3.3 – Análise termogravimétrica dos resíduos, lodo biológico e resíduo de algodão. ....	42
Tabela 3.4 – Teores de Ca, Mg, Zn, Fe, Mn, Cu e B dos resíduos da indústria têxtil. ...	42
Tabela 3.5 – Valores médios da análise química imediata, poder calorífico superior, poder calorífico inferior e poder calorífico útil, densidade a granel e densidade energética dos resíduos da indústria têxtil.....	43
Tabela 4.1 – Valores médios da taxa de retorno em comprimento (%) dos briquetes em função da proporção de lodo na composição e da pressão de compactação	57
Tabela 4.2 – Valores médios da perda de massa (%) dos briquetes em função da proporção de lodo na composição e da pressão de compactação.....	58
Tabela 4.3 – Valores médios de materiais voláteis (%) dos briquetes em função da proporção de lodo na composição e da pressão de compactação.....	58
Tabela 4.4 – Valores médios de carbono fixo (%) dos briquetes em função da proporção de lodo na composição e da pressão de compactação.....	59
Tabela 4.5 – Valores médios do teor de cinzas (%) dos briquetes em função da proporção de lodo na composição e da pressão de compactação.....	59

Tabela 4.6 – Valores médios de poder calorífico superior ( $\text{MJ.kg}^{-1}$ ) dos briquetes em função da proporção de lodo na composição e da pressão de compactação .....	<b>60</b>
Tabela 4.7 – Valores médios densidade aparente ( $\text{g.cm}^{-3}$ ) dos briquetes em função da proporção de lodo na composição e da pressão de compactação .....	<b>61</b>
Tabela 4.8 – Valores médios de carga máxima de ruptura (kgf) dos briquetes em função da proporção de lodo na composição e da pressão de compactação .....	<b>62</b>
Tabela 4.9 – Valores médios de umidade de equilíbrio higroscópico (%) dos briquetes em função da proporção de lodo na composição e da pressão de compactação .....	<b>63</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIQUIM	Associação Brasileira da Indústria Química
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CIC	Companhia Industrial Cataguases
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Conmetro	Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
COV	Composto orgânico volátil
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DQO	Demanda química de oxigênio
EPA	U.S. Environmental Protection Agency
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
MDIC	Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior
NaOH	Hidróxido de sódio
N-NH <sub>3</sub>	Nitrogênio amoniacal
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
PCU	Poder calorífico útil
PSI	Pound force per square inch (libra força por polegada quadrada)
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
SST	Sólidos suspensos totais
TECPAR	Instituto de Tecnologia do Paraná
TGA	Análise termogravimétrica

## RESUMO

AVELAR, Nayara Vilela. M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2012. **Potencial dos resíduos sólidos da indústria têxtil para fins energéticos.** Orientadora: Ana Augusta Passos Rezende. Coorientadores: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, Cláudio Mudado Silva e Ann Honor Mounteer.

Esta pesquisa foi realizada com o objetivo de estudar a viabilidade técnica de utilizar os resíduos sólidos, lodo biológico e resíduo de algodão, gerados pela indústria têxtil, como matéria-prima para a produção de briquetes para a geração de energia. Buscou-se, inicialmente, caracterizar os resíduos, a fim de se avaliar o potencial destes como combustíveis na geração de energia. Posteriormente, o lodo biológico foi misturado com o resíduo de algodão, nas proporções de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%, para a fabricação dos briquetes. Foram utilizadas três pressões (900, 1.200 e 1.500 PSI) para a compactação dos resíduos, durante 5 minutos e tempo de resfriamento também de 5 minutos, à temperatura de 90 °C. Determinaram-se o poder calorífico, a análise química imediata, a densidade aparente, a carga de ruptura máxima e a umidade de equilíbrio higroscópico dos briquetes. Para avaliar os efeitos ambientais da combustão destes resíduos, determinou-se a periculosidade dos resíduos e de suas cinzas residuais. De acordo com os resultados, o lodo biológico e o resíduo de algodão foram classificados como resíduos não perigosos e não inertes (Classe II A). As propriedades físicas e químicas dos resíduos demonstraram que os mesmos apresentam potencial para a produção de energia. As cinzas foram classificadas como resíduos perigosos (Classe I) e, sendo assim, devem ser tratadas e dispostas adequadamente. Os briquetes apresentaram menor teor de materiais voláteis e, conseqüentemente, maior teor de carbono fixo e cinzas, em relação às matérias-primas utilizadas para a sua produção, evidenciando efeito das variáveis do processo de briquetagem. O poder calorífico superior obtido nos briquetes não diferiu das matérias-primas utilizadas. A pressão de compactação de 1.200 PSI mostrou-se ideal para o processo de briquetagem em escala laboratorial. A melhor proporção de mistura entre os dois resíduos para a produção dos briquetes foi a 25% de lodo. Conclui-se que os resíduos da indústria têxtil podem ser considerados como combustível no processo de combustão para a geração de energia.

## ABSTRACT

AVELAR, Nayara Vilela. M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, October 2012. **Potential of solid waste from the textile industry for energy purposes.** Adviser: Ana Augusta Passos Rezende. Co-advisers: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, Cláudio Mudado Silva and Ann Honor Mounteer.

The objective of this research was to study the technical feasibility of using the solid wastes, biological sludge and cotton residues, generated by the textile mill, as raw material in the production of briquettes for energy generation. Initially, the study aimed to characterize the solids waste, in order to evaluate their potential as fuels in energy generation. Subsequently, the biological sludge was mixed with cotton residues in proportions of 0, 25, 50, 75 and 100%, to produce of the briquettes. Three pressures (900, 1200 and 1500 PSI) were used for waste compaction for five minutes and a temperature of 90°C was maintained during the cooling time, of also five minutes. The calorific value, chemical analysis, apparent density, rupture load and hygroscopic moisture equilibrium were determined. In order to study the environmental effects of the solid waste combustion, the hazardousness of the waste and residual ashes was determined. According to the results, the biological sludge and cotton residues were classified as non-hazardous and non-inert wastes (Class II A). The physical and chemical properties of the solid waste showed that they have potential for energy production. The ashes were classified as hazardous wastes (Class I), thus they should be treated and disposed properly. The briquettes showed lower content of the volatile matter and, consequently, higher content of fixed carbon and ashes in relation to raw materials for this production, which demonstrates the effect of the briquetting process variables. The high calorific value of the briquettes did not differ to the raw materials commonly used. The compaction pressure of 1200 PSI proved ideal to the laboratory scale briquetting process. The best mixing proportion between the two residues for production of briquettes was that with 25% sludge. It was possible to conclude that waste from a textile mill can be considered as fuel in the combustion process for power generation.

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

A indústria têxtil tem como objetivo a transformação de fibras em fios, de fios em tecidos e de tecidos em peças de vestuário e/ou em artigos para aplicações técnicas.

A manufatura dos tecidos é uma das mais antigas tecnologias utilizadas pelo homem, e os tecidos conhecidos mais antigos datam, aproximadamente, do ano de 5000 a.C. As primeiras fibras a serem transformadas em fios e tecidos foram o linho e o algodão. A automação da indústria têxtil coincidiu com a Revolução Industrial, quando as máquinas, até então acionadas por força humana ou animal, passaram a ser acionadas por vapor e, mais tarde, por motores elétricos.

No Brasil, o processo de industrialização têxtil iniciou-se no final do século XIX (COSTA, 2008). Nos dias atuais, o país exerce papel importante no cenário mundial, com relação à produção de artigos têxteis, sendo o segundo maior produtor dos tecidos de malha, o quinto em confeccionados e o sexto na produção de fios, segundo informações fornecidas pelos países membros da Internacional Textile Manufacturers Federation (HASSEMER, 2006).

A indústria têxtil gera uma grande quantidade de resíduos sólidos, principalmente os lodos primário e biológico, oriundos dos sistemas de tratamento de efluentes industriais. O lodo biológico têxtil apresenta composição variável e, normalmente, tem altos teores de matéria orgânica, nitrogênio, fósforo e micronutrientes, além de conter corantes com metais pesados e agentes patogênicos. Esses resíduos podem ser empregados na agricultura, ser incinerados ou estabilizados. Após a estabilização, eles podem se tornar matéria-prima alternativa para outros processos, como, por exemplo, combustão para a obtenção de energia, garantindo uma produção sustentável, além da minimização de impactos ambientais.

De modo geral, os resíduos são polidispersos, volumosos e apresentam baixa densidade. Logo, o processo de densificação apresenta-se como uma alternativa para minimizar esses problemas e possibilitar a geração de energia a partir dos resíduos sólidos, lodo biológico e resíduo de algodão, gerados na indústria têxtil.

O processo de densificação da biomassa, como a briquetagem, consiste na aplicação de pressão em uma massa de partículas dispersas, com o objetivo de torná-las um sólido geométrico compacto de alta densidade, transformando-o em um produto de alto valor combustível. Essa técnica apresenta uma série de vantagens, tais como

aumento do conteúdo calorífico do material por unidade de volume, maior facilidade de transporte e estocagem, queima uniforme e de qualidade, redução da possibilidade da combustão espontânea na estocagem e redução da biodegradação dos resíduos. Devido à baixa umidade, atinge rapidamente temperaturas altas, produzindo menos fumaça, cinzas, fuligem e o material resultante da compactação atinge maior temperatura de chama e tem maior regularidade térmica, mantendo o calor homogêneo.

Além das vantagens citadas acima, existe também um interesse econômico, pois o excedente da produção pode ser comercializado, gerando rendimentos para a indústria têxtil.

No capítulo 1 apresenta-se uma revisão bibliográfica, contendo o processo produtivo da indústria têxtil em geral, bem como um estudo de caso da Companhia Industrial Cataguases, incluindo a geração de resíduos dessa tipologia industrial, a geração e o tratamento de lodo proveniente de estações de tratamento de esgoto. Também é feita uma breve descrição do processo de briquetagem.

O capítulo 2, intitulado “Caracterização dos resíduos da indústria têxtil para geração de energia”, trata-se de um estudo experimental, em que são feitas a classificação e a caracterização física e química dos resíduos utilizados na produção de briquetes e também a classificação das cinzas resultantes da combustão desses resíduos.

No capítulo 3, intitulado “Produção de briquetes a partir de resíduos da indústria têxtil para fins energéticos”, trata-se da produção dos briquetes e da caracterização física, química e mecânica dos mesmos.

Desse modo, este trabalho foi realizado com o objetivo geral de avaliar a viabilidade técnica e ambiental do uso de resíduo de algodão e do lodo biológico proveniente do tratamento de efluentes por lodos ativados de uma indústria têxtil para a produção de briquetes. Os objetivos específicos foram:

- i. classificar os resíduos de acordo com NBR 10004 (ABNT, 2004);
- ii. determinar as propriedades físicas e químicas dos resíduos;
- iii. produzir briquetes a partir da mistura de resíduo de algodão e lodo biológico, em diferentes proporções, em escala laboratorial;
- iv. determinar as propriedades físicas, químicas e mecânicas dos briquetes;
- v. classificar as cinzas resultantes da combustão do resíduo de algodão e de lodo biológico, de acordo com NBR 10004 (ABNT, 2004).

## 2. CAPÍTULO 1: REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Processo Produtivo

A indústria têxtil tem como objetivo a transformação de fibras em fios, de fios em tecidos e de tecidos em peças de vestuário ou em artigos para aplicações técnicas. Seu processo produtivo é muito diversificado, podendo apresentar todas as etapas do processo têxtil (fiação, tecelagem e beneficiamento) ou apenas um dos processos (somente fiação, somente tecelagem, somente beneficiamento ou somente fiação e tecelagem etc.).

Segundo Bastian e Rocco (2009), as principais etapas do processo de fabricação de tecidos são:

- fiação: etapa de obtenção do fio, a partir das fibras têxteis, que pode ser enviado para o beneficiamento ou diretamente para tecelagens e malharias;
- tecelagem e/ou malharia: etapa de elaboração de tecido plano, tecidos de malha circular ou retilínea, a partir dos fios têxteis;
- beneficiamento: etapa de preparação dos fios para seu uso final ou não, envolvendo tingimento, engomagem, retorção (linhas, barbantes, fios especiais, etc.) e tratamento especiais;
- enobrecimento: etapa de preparação, tingimento, estamparia e acabamento de tecidos, malhas ou artigos confeccionados;
- confecções: nesta etapa, o setor tem aplicação diversificada de tecnologias para os produtos têxteis, acrescida de acessórios incorporados às peças.

Na Figura 2.1 apresenta-se a estrutura da cadeia produtiva da indústria têxtil.

A cadeia produtiva pode ser, inicialmente, classificada em função das fibras têxteis utilizadas. As fibras dividem-se em dois grupos, denominados de fibras naturais e fibras manufaturadas, conhecidas também como fibras químicas, conforme o regulamento técnico do Mercosul sobre etiquetagem de produtos têxteis – Resolução Conmetro/MDIC nº2, de 06/05/2008 (BASTIAN e ROCCO, 2009). As fibras naturais podem ser classificadas em vegetais, animais e minerais; as manufaturadas foram desenvolvidas, principalmente, para atender à elevada demanda por artigos têxteis. Elas podem ser produzidas a partir de celulose regenerada (viscose e acetato) ou ser totalmente sintéticas (poliéster ou poliamida).

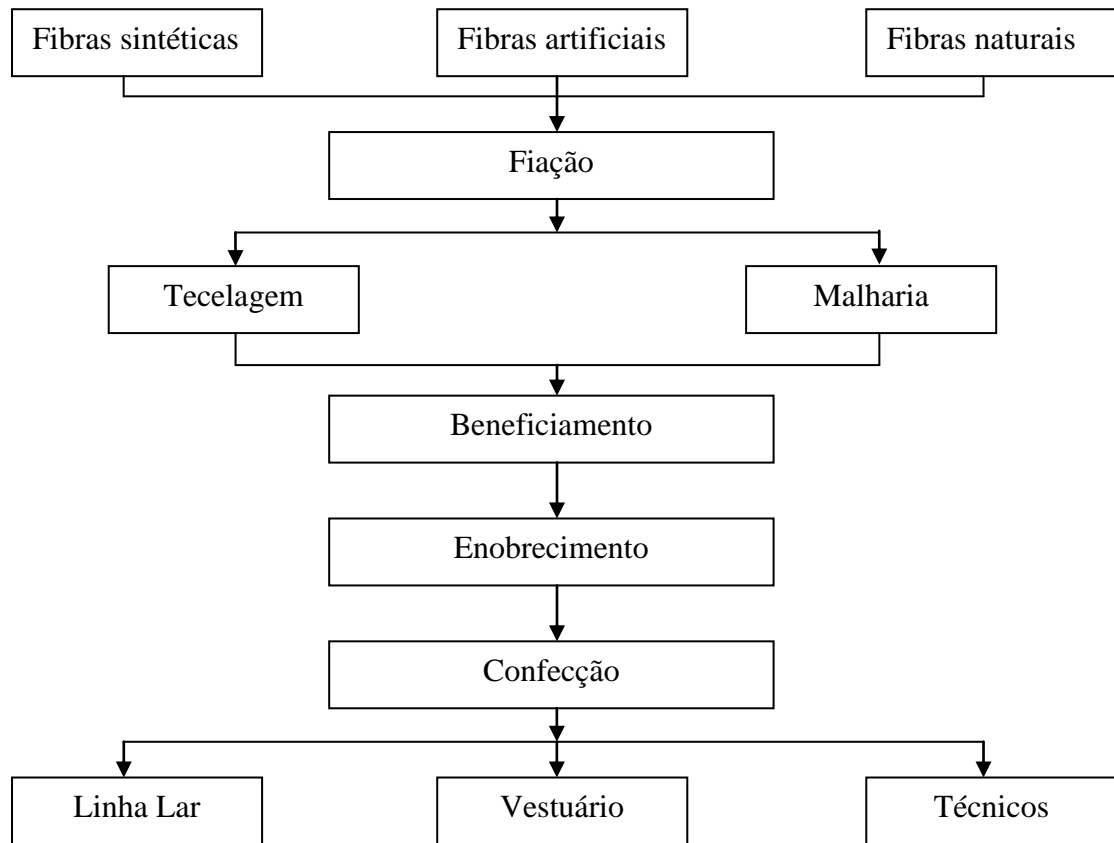


Figura 2.1 – Cadeia produtiva têxtil e de confecções  
 Fonte: adaptado de COSTA e ROCHA (2009)

### 2.1.1. Fiação

Os processos de fiação compreendem a produção de fios a partir de fibras naturais ou manufaturadas e diferem de acordo com o tipo de fios e as tecnologias aplicadas. Eles se constituem de etapas de limpeza das fibras, paralelização das mesmas, assim como torção e estiragem, para que tomem a forma de fios. Podem-se produzir fios cardados, fios penteados e fios *open end*. (GORINI e SIQUEIRA, 1997).

Os fios penteados são os mais nobres e com maior valor de matéria-prima e tecnologia agregado; os cardados são intermediários neste conceito e os fios *open end*, os de menor valor comercial (SILVA e CAMPOS, 2010).

Segundo Souza (2009), os setores produtivos de fiações são definidos como: sala de abertura, cardas, passadeiras de 1° ou 2°, unilaps, penteadeira, maçarqueira, filatório de anéis, conicaleira e filatório *open end*.

### **2.1.2. Tecelagem/Malharia**

Após a fiação, o processo produtivo continua com a tecelagem, ou malharia, em que os fios são transformados em tecidos.

A tecelagem se caracteriza, tradicionalmente, pelo cruzamento de dois sistemas de fios paralelos. O primeiro sistema é composto por fios que entram no tear, já paralelizados, chamados fios de urdume (ALCÂNTARA e DALTIM, 1996).

Antes da tecelagem, os fios de urdume passam pelo processo de engomagem, visando aumentar a sua resistência mecânica, para resistir aos esforços nos teares, resultando em um tecido mais incorporado, na etapa da confecção (MARTINS, 1997).

### **2.1.3. Beneficiamento têxtil**

O beneficiamento têxtil consiste em um conjunto de processos aplicados aos materiais têxteis, objetivando transformá-los, a partir do estado cru, em artigos brancos, tintos, estampados e acabados (FREITAS, 2002). Dentre os principais processos do beneficiamento citam-se desengomagem, purga, alveamento, mercerização, tingimento e estamparia.

A desengomagem visa à remoção da goma aplicada anteriormente no processo de tecelagem. Purga é o processo de limpeza do tecido, ou malha, com a finalidade de remover materiais oleosos (graxos ou não) e impurezas (BASTIAN e ROCCO, 2009). O alveamento tem o objetivo de eliminar as ceras e graxas, substâncias solúveis e eliminar a pigmentação amarelada das fibras, a fim de preparar o substrato têxtil para os tratamentos subsequentes, como tingimento ou estampagem (FREITAS, 2002). Mercerização é o processo químico contínuo utilizado para produtos de algodão e algodão/poliéster, para melhorar as propriedades físico-químicas da fibra. As operações de tingimento são empregadas em vários estágios de produção para adicionar cor, complexidade e aumentar o valor do produto. Os materiais têxteis são tingidos utilizando-se uma ampla gama de corantes, técnicas e equipamentos. Os corantes utilizados pelas indústrias são, em grande parte, sintéticos, normalmente derivados de alcatrão e de petróleo. A estamparia tem a função de conferir coloração ao material têxtil de forma localizada (BASTIAN e ROCCO, 2009), utilizando uma variedade de técnicas e tipos de equipamentos.

O acabamento final tem a finalidade de conferir aos materiais têxteis um aspecto que atenda aos desejos do consumidor, além de garantir melhor resistência ao uso (ALCÂNTARA e DALTIM, 1996).

#### **2.1.4. Confeção**

Na parte de confecção têm-se as peças acabadas. Segundo Bastian e Rocco (2009), os principais processos de confecção são modelagem; enfiado, etapa que aumenta o rendimento do corte do tecido; corte; costura; acabamento, que envolve o arremate das peças, a revisão para a verificação da qualidade da costura, passadoria e lavanderia de peças, e embalagem/expedição.

### **2.2. Geração de Resíduos**

As indústrias têxteis utilizam grandes quantidades de água. Este fato, associado ao baixo aproveitamento dos insumos (corantes, detergentes, engomantes, amaciantes, etc.), faz com que esta tipologia seja responsável pela geração de grandes volumes de resíduos, com elevada carga orgânica e forte coloração (SOUZA e PERALTA-ZAMORA, 2005).

Segundo Müezzinoğlu (1998), as indústrias têxteis podem poluir os corpos d'água e os solos, devido à descarga de grandes volumes de águas residuárias e lodos, que podem conter altos níveis de compostos tóxicos, como metais contendo pigmentos ou materiais orgânicos. Além disso, podem poluir o ar ambiente e interior, devidos aos poluentes aéreos lançados, tais como gases de combustão e vapores químicos e gerar grandes quantidades de resíduos sólidos.

A produção de águas residuárias é, de longe, a maior fonte de poluição das indústrias têxteis, sendo o beneficiamento o principal responsável pela geração dos efluentes. Os efluentes têxteis caracterizam-se por uma grande variação de cargas, em razão da própria variação do processo industrial, que envolve a sequência de produção e acabamento têxtil, em cujo processo são utilizados corantes, tensoativos espessantes e produtos químicos diversos que tornam o efluente muito complexo, geralmente com altas concentrações de DBO e DQO, e com diferentes características de biodegradação (HASSEMER e SENS, 2002).

De acordo com Soares (1998), a composição média dos efluentes das indústrias têxteis pode ser dada por: sólidos totais na faixa de 1.000 a 1.600 mg.L<sup>-1</sup>; DBO, de 200 a 600 mg.L<sup>-1</sup>; alcalinidade total de 300 a 900 mg.L<sup>-1</sup> e sólidos em suspensão, de 30 a 50 mg.L<sup>-1</sup>. Essa caracterização do efluente apenas define as ordens de grandeza das características dos efluentes, pois a composição do efluente é dependente do processo e do tipo de fibra processada.

Esses efluentes, normalmente, são tratados por processos físicos, químicos e biológicos convencionais (coagulação química e lodos ativados), os quais apresentam bons resultados na redução carbonácea, mas têm como inconveniente a alta produção de lodo e a necessidade de disponibilização de grandes áreas para implantação do processo de tratamento e de aterros sanitários industriais para disposição do lodo (HASSEMER e SENS, 2002).

Ao longo da cadeia têxtil existem diversas operações que geram resíduos, desde o descaroçamento do algodão até restos de fios e tecidos nas confecções, variando estes rejeitos quanto à característica e à quantidade. Em especial, merecem destaque os resíduos perigosos oriundos de embalagem ou, mesmo, do uso de produtos químicos, como, por exemplo, a perda de pasta na estamperia, a geração de lodos biológicos de tratamento e o resíduo de algodão, entre outros (BASTIAN e ROCCO, 2009).

O lodo é um material não inerte e seu depósito não pode ocorrer em qualquer local. Assim, alternativas múltiplas são testadas para o descarte final desse resíduo, que pode ser empregado na agricultura, ser incinerado ou estabilizado. Após estabilização, esse resíduo pode ser uma matéria-prima alternativa no desenvolvimento de novos materiais e/ou produtos ou enviado para aterros industriais. Segundo Bastian e Rocco (2009), é importante salientar que esse lodo possui poder calorífico satisfatório e pode ser utilizado como combustível, em caldeiras a biomassa.

O resíduo de algodão compreende as microfibras soltas no processo de fiação e tecelagem que são sugadas por tubulações e enfardadas junto com as folhas e sementes, podendo ser reaproveitado na elaboração de briquetes, material compactado utilizado como combustível para as caldeiras.

A quantidade de resíduos sólidos gerada depende do tamanho e do tipo de operação da indústria, da natureza do resíduo, da eficiência da máquina ou do processo de gerar resíduos, além do nível de conscientização sobre os problemas dos resíduos sólidos e técnicas de gestão de operadores e administradores da indústria (EPA, 1996).

Em relação às emissões atmosféricas, as caldeiras são a maior fonte de geração, devido às emissões de óxido de nitrogênio e enxofre (EPA, 1996).

Outras fontes importantes de emissões atmosféricas incluem as operações de acabamento, secagem, estampagem, tingimento, preparação dos tecidos e estações de tratamento de águas residuárias. Estes processos podem emitir formaldeído, ácidos e outros compostos voláteis (EPA, 1997).

Na Figura 2.2 e na Tabela 2.1 apresentam-se os poluentes típicos associados aos vários processos de fabricação têxtil.

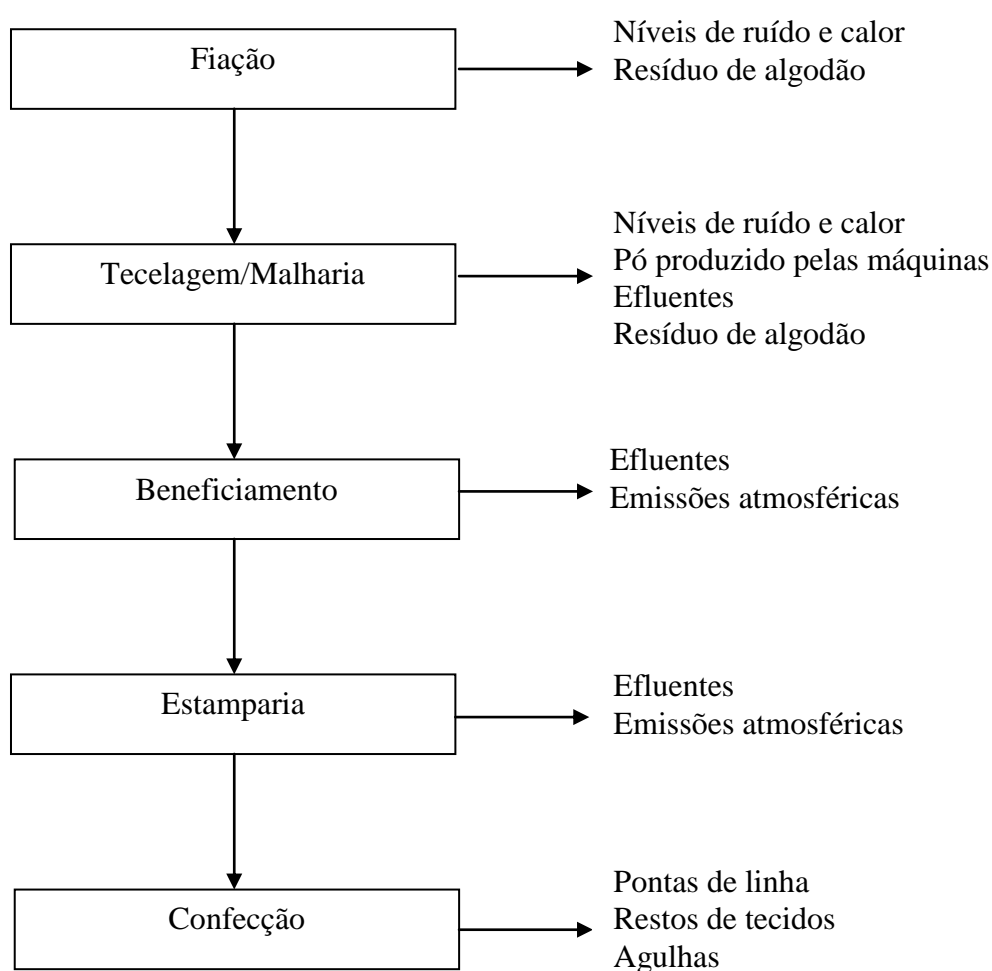


Figura 2.2 – Fluxograma do processo produtivo da indústria têxtil e as etapas de geração de resíduos

Tabela 2.1 – Resumo dos poluentes emitidos durante o processamento têxtil

Processo	Emissões atmosféricas	Águas residuárias	Resíduos sólidos
Preparação da fibra	Pouca ou nenhuma geração	Pouca ou nenhuma geração	Fibras, embalagens e resíduos duros
Fiação	Pouca ou nenhuma geração	Pouca ou nenhuma geração	Embalagem, fios, fibras, resíduo de algodão e resíduos de limpeza
Engomagem	Compostos orgânicos voláteis (COVs)	DBO, DQO, metais, água de lavagem	Fibras, fios, embalagens, restos do banho de goma
Tecelagem/malharia	Pouca ou nenhuma geração	Pouca ou nenhuma geração	Embalagens, fios, tecidos, resíduo de algodão, óleo usado
Desengomagem	COVs	DBO, lubrificantes, biocidas, compostos antiestáticos, água de lavagem	Embalagens, fibras, fios, resíduos de limpeza e manutenção contendo solventes
Alvejamento	COVs	Desinfetantes, inseticidas, NaOH, detergentes, graxas, óleos, pectina, cera, lubrificantes, solventes	Pouca ou nenhuma geração
Mercerização	Pouca ou nenhuma geração	pH elevado, NaOH	Pouca ou nenhuma geração
Tingimento	COVs	Metais, sal, cor, surfactantes, compostos tóxicos, compostos orgânicos, materiais catiônicos, DBO, DQO, solventes, acidez/alcalinidade,	Pouca ou nenhuma geração
Estamparia	Vapores de solventes, ácido acético, gases de combustão, material particulado	Sólidos suspensos, ureia, solventes, cor, metais, calor, DBO, espuma	Pouca ou nenhuma geração
Acabamento	COVs, vapores de formaldeído, gases de combustão, material particulado, contaminantes em produtos químicos	DBO, DQO, sólidos suspensos, compostos tóxicos, solventes	Tecidos, embalagens
Confecção	Pouca ou nenhuma geração	Pouca ou nenhuma geração	Tecidos

Fonte: adaptado de EPA, 1997

### 2.3. Tratamento de Efluentes e a Geração de Lodo

A produção de lodo a ser gerado é função precípua do sistema de tratamento utilizado para a fase líquida. Em princípio, todos os processos de tratamento biológico geram lodo. Os processos que recebem o esgoto bruto em decantadores primários geram o lodo primário, composto pelos sólidos sedimentáveis do esgoto bruto (VON SPERLING e ANDREOLI, 2001). A concentração de sólidos totais dos lodos nesta fase do processo deve estar em torno de 1% a 6%. Este lodo pode ser adensado e desidratado com relativa facilidade, desde que este não se torne séptico. O lodo primário é altamente putrescível, gera maus odores e contém alta concentração de patógenos, que podem causar vários tipos de doença se em contato humano (MIKI, 1998).

Na etapa biológica de tratamento, tem-se o que se chama de lodo biológico, ou lodo secundário. Este lodo é a própria biomassa que cresceu à custa do alimento fornecido pelo esgoto afluente. Caso a biomassa não seja removida, ela tende a se acumular no sistema, podendo, eventualmente, sair com o efluente final, deteriorando sua qualidade, em termos de sólidos em suspensão e matéria orgânica (VON SPERLING e ANDREOLI, 2001). O lodo biológico é gerado nos processos de tratamento de lodos ativados, filtro biológico, etc. Este lodo é difícil de adensar e desidratar.

Os lodos provenientes do tratamento primário e secundário podem, ainda, ser designados como não digeridos (bruto). O lodo digerido é o lodo bruto que sofre a estabilização biológica, normalmente pela via anaeróbia. Os produtos da digestão anaeróbia são gás carbônico, gás metano e água, e, como consequência deste processo, há uma redução na concentração de sólidos voláteis (MIKI, 1998).

Dependendo do tipo de sistema, o lodo primário pode ser enviado para o tratamento juntamente com o lodo secundário. Nesse caso, o lodo resultante da mistura passa a ser chamado de lodo misto (VON SPERLING e ANDREOLI, 2001).

Em sistemas de tratamento que incorporam uma etapa físico-química, quer para melhorar o desempenho do decantador primário, quer para dar um polimento ao efluente secundário, tem-se o lodo químico (VON SPERLING e ANDREOLI, 2001).

Em todos estes casos, é necessário o descarte do lodo, ou seja, sua retirada da fase líquida. No entanto, nem todos os sistemas de tratamento de esgotos necessitam do descarte contínuo desta biomassa. Alguns conseguem armazenar o lodo por todo o

horizonte de operação da estação (ex.: lagoas facultativas); outros permitem um descarte apenas eventual (ex.: reatores anaeróbios) e outros ainda requerem uma retirada contínua ou bastante frequente (ex.: lodos ativados). O lodo biológico descartado é também denominado lodo excedente (VON SPERLING e ANDREOLI, 2001).

A quantidade de lodo produzido em uma estação de tratamento de efluentes pode variar bastante, dependendo das características iniciais do esgoto a ser tratado e do processo de tratamento empregado.

## **2.4. Tratamento do Lodo**

O principal objetivo do tratamento do lodo de esgoto é gerar um produto mais estável e com menor volume para facilitar seu manuseio e, conseqüentemente, reduzir os custos nos processos subsequentes. Esse tratamento se dá por meio de processos físicos, químicos e biológicos (PEDROZA *et al.*, 2010). Geralmente, o tratamento do lodo é realizado por meio das seguintes etapas:

- adensamento ou espessamento: redução de umidade (redução de volume);
- estabilização: redução de matéria orgânica (redução de sólidos voláteis);
- condicionamento: preparação para a desidratação (principalmente mecânica);
- desaguamento: redução adicional de umidade (redução de volume);
- higienização: remoção de organismos patogênicos;
- disposição final: destinação final dos subprodutos.

Antes de tomar uma decisão a respeito de qual tratamento deve ser aplicado ao lodo, é de grande interesse conhecer a quantidade de lodo produzido, suas características químicas e microbiológicas e os custos de implantação, de operação e de gerenciamento do tratamento. Só dessa forma é que se pode assegurar o êxito do método de tratamento a ser utilizado (CHÁVEZ, TOSCANO e MÁRQUEZ, 2000).

### **2.4.1. Adensamento**

O adensamento do lodo proveniente das unidades de tratamento da fase líquida consiste no aumento da concentração de sólidos nele contidos, por meio da remoção parcial da quantidade de água que caracteriza o seu grau de umidade. Portanto, o adensamento visa à redução do volume do lodo para o manuseio e o conseqüente processamento e destino final. Normalmente, o líquido removido é retornado para o

tratamento primário da estação de tratamento de efluentes (ETE); em alguns casos, pode ser lançado a montante do tratamento biológico (JORDÃO e PÊSSOA, 2011).

O objetivo do adensamento é reduzir a água dos resíduos através de meios físicos. Dessa forma, consegue-se reduzir a capacidade volumétrica das unidades subsequentes de tratamento, como volume dos digestores, tamanho das bombas, etc. Ainda como benefício, pode-se citar a redução do consumo de produtos químicos no desaguamento e do consumo de energia do aquecimento dos digestores (MIKI, ALÉM SOBRINHO e VAN HAANDEL, 2006).

O adensamento é mais utilizado nos processos de tratamento primário, lodos ativados e filtros biológicos percoladores, tendo importantes implicações no dimensionamento e na operação dos digestores (GONÇALVES, LUDUVICE e VON SPERLING, 2001).

#### **2.4.2. Desaguamento**

O desaguamento, também conhecido (erroneamente) como desidratação, é uma operação unitária física (mecânica) que reduz o volume do lodo por meio da redução do seu teor de água (MIKI, ALÉM SOBRINHO e VAN HAANDEL, 2006). A capacidade de desaguamento varia de acordo com o tipo de lodo. Um lodo ativado, por exemplo, é mais fácil de ser desaguado do que um lodo primário digerido anaerobiamente. Essa variação na capacidade de desaguamento está diretamente relacionada com o tipo de sólido e a forma como a água está ligada às partículas do lodo (MALTA, 2001).

Conforme Von Sperling (2005), o desaguamento, realizado com o lodo digerido, tem impacto importante nos custos de transporte e destino final do lodo. As principais razões para se realizar o desaguamento são: redução do custo de transporte para o local de disposição final; melhoria nas condições de manejo do lodo, já que o lodo desaguado é mais facilmente processado e transportado; aumento do poder calorífico do lodo, por meio da redução da umidade com vistas à preparação para incineração; redução do volume para disposição em aterro sanitário ou reuso na agricultura e diminuição da produção de lixiviados, quando da sua disposição em aterros sanitários.

Os processos de desaguamento podem ser naturais ou mecânicos, sendo a escolha do processo dependente do tipo de lodo e da área disponível. Dentre os processos naturais, destacam-se os leitos de secagem e as lagoas de secagem. Já dentre

os processos mecânicos, encontram-se as centrífugas, as prensas desaguadoras e os filtros prensas.

A escolha do processo de desaguamento é função do porte da estação de tratamento de efluentes (ETE), do tipo de lodo, da área, dos recursos financeiros e da mão de obra disponíveis. Para ETEs de pequeno porte, geralmente localizadas em regiões com disponibilidade de área e mão de obra pouco especializada, geralmente são utilizados sistemas naturais, tais como lagoas e leitos de secagem. Para ETEs de médio e grande porte, a maior parte das plantas emprega sistemas mecânicos, que têm a capacidade de tratar grandes quantidades de lodo em uma área reduzida, demandando, no entanto, mão de obra especializada, dada a complexidades destes processos.

### **2.4.3. Condicionamento**

O condicionamento é um processo para melhorar as características de separação das fases sólido-líquida do lodo, seja por meios físicos ou químicos.

O principal objetivo do condicionamento é aumentar o tamanho das partículas no lodo, envolvendo as pequenas partículas em agregados de partículas maiores. Isto é realizado por meio de uma etapa de coagulação seguida de outra de floculação. A coagulação diminui a intensidade das forças eletrostáticas de repulsão entre as partículas, desestabilizando-as. A compressão da dupla camada elétrica que envolve superficialmente cada partícula é o mecanismo que facilita a sua aproximação. A floculação permite a aglomeração dos coloides e dos sólidos finos por meio de baixos gradientes de agitação (GONÇALVES *et al.*, 2001).

O tipo de condicionamento influencia diretamente a eficiência dos processos de desaguamento. Por isso, a seleção de um determinado processo deve se basear em critérios de custo de capital, operação e manutenção do sistema como um todo. Custos relativos ao impacto da recirculação do sobrenadante nas outras etapas que compõem a planta, na qualidade do efluente e nas emissões atmosféricas, devem ser integrados à análise (GONÇALVES *et al.*, 2001).

O condicionamento pode ser realizado por meio da utilização de produtos químicos inorgânicos, de produtos químicos orgânicos ou de tratamento térmico (VASQUES, 2008). Os orgânicos normalmente utilizados incluem o extenso grupo de

polieletrólitos orgânicos (polímeros) e os inorgânicos frequentemente utilizados são os sais férrico, ferrosos, de alumínio e óxido ou hidróxido de cálcio (DAVID, 2002).

#### **2.4.4. Estabilização**

A estabilização significa biodegradação de parte da matéria orgânica e redução de odores e do nível de microrganismos patogênicos (MALTA, 2001). Segundo Metcalf e Eddy (2004), os processos de estabilização do lodo de esgoto objetivam a redução de organismos patogênicos, a eliminação de odores e a inibição, a redução ou a eliminação do potencial de putrefação.

De modo geral, o lodo estável é aquele que minimiza os riscos para a saúde pública e o meio ambiente. Portanto, a estabilização do lodo está diretamente ligada ao seu teor em microrganismos patogênicos e ao grau de putrescibilidade (AISSE, FERNANDES e SILVA, 2001).

A importância da estabilização está vinculada ao tipo de destino final do lodo. Na reciclagem agrícola, a estabilização está ligada diretamente a odores, à atração de moscas e ao conteúdo de patogênicos, portanto, à acessibilidade do produto. Na disposição em aterro sanitário, o grau de estabilização tem importância média, sendo, principalmente, ligado à facilidade de desidratação do lodo e, em menor escala, aos odores. Na incineração, o grau de estabilização também é importante, porém, de forma inversa ao uso agrícola: um lodo muito estabilizado, que perdeu muito de sua fração orgânica, também perdeu muito de seu potencial calorífico (MALTA, 2001).

Conforme Luduvic (2001), os processos de estabilização podem ser divididos em estabilização química, estabilização térmica e estabilização biológica.

Na estabilização química são adicionados ao lodo produtos que podem inibir a atividade biológica ou oxidar a matéria orgânica. O tratamento químico mais utilizado é a via alcalina, em que uma base, normalmente a cal, é misturada ao lodo, elevando seu pH e destruindo a maior parte dos microrganismos patogênicos (FERNANDES e SOUSA, 2001).

Na estabilização biológica são utilizados os mecanismos naturais de biodegradação que transformam a parte mais putrescível do lodo. A via pode ser anaeróbia ou aeróbia, sendo digestão anaeróbia, digestão aeróbia, digestão aeróbia

autotérmica, compostagem (MALTA, 2001) e os sistemas alagados construídos, os principais processos.

A digestão anaeróbia é um processo bioquímico complexo, em que diversos grupos de organismos anaeróbios e facultativos assimilam e destroem simultaneamente a matéria orgânica, em ausência de oxigênio dissolvido. A evolução do processo necessita apenas de seu confinamento em um espaço (volume útil) em condições favoráveis às reações bioquímicas inerentes da fermentação natural. Normalmente, os sólidos em suspensão, fixos e voláteis, são removidos da massa líquida afluyente à ETE e processados em unidades apropriadas, denominadas digestores, ou biodigestores (JORDÃO e PÊSSOA, 2011).

A digestão aeróbia é também um processo de oxidação bioquímica dos sólidos biodegradáveis contidos nos esgotos, com abundância de oxigênio dissolvido em toda a massa líquida, favorecendo a atividade de bactérias aeróbias e a formação de subprodutos, tais como matéria orgânica estabilizada (lodo digerido), gás carbônico e água (JORDÃO e PÊSSOA, 2011).

A compostagem é um processo aeróbio de decomposição da matéria orgânica efetuada por meio de condições controladas de temperatura, umidade, oxigênio e nutrientes. O produto resultante desse processo tem grande valor agrônômico como condicionador de solos. A inativação dos microrganismos patogênicos ocorre, principalmente, através da via térmica, ocasionada pelo aumento da temperatura na fase de maior atividade do processo.

Os sistemas alagados construídos, também conhecidos por filtros plantados com macrófitas, podem ser classificados como um processo de separação sólido-líquido, produzindo um produto sólido desaguado ou seco e um líquido (percolado) com necessidade de tratamento antes da descarga ou uso (HEINSS e KOOTTATEP, 1998).

#### **2.4.5. Secagem térmica**

O processo de secagem térmica é uma das mais eficientes e flexíveis formas de reduzir o teor de umidade de “tortas” oriundas do desaguamento de lodos orgânicos domésticos e industriais disponíveis, atualmente em uso (GONÇALVES *et al.*, 2001). Segundo Fernandes e Souza (2001), alguns autores classificam este método também

como uma forma de estabilização, devido à eliminação térmica dos microrganismos patogênicos e ao bloqueio dos odores emanados pelo lodo.

A secagem térmica dos lodos é uma operação realizada por meio da aplicação de calor para a remoção da água nele contida, por processo de evaporação. A elevação da temperatura provoca a redução do teor de umidade do lodo a valores muito menores do que aqueles possíveis de serem alcançados pelos processos usuais de desidratação mecânica. Produtos finais com umidade entre 5% e 10% (90% e 95% de teor de sólidos) são, geralmente, obtidos nas unidades de secagem térmica (MIKI, ALÉM SOBRINHO e VAN HAANDEL, 2006).

Os principais benefícios da secagem térmica do lodo são, principalmente, redução significativa no volume de lodo; redução no custo de transporte e estocagem (quando for o caso); produto estabilizado facilmente estocado, manuseado e transportado; produto final praticamente livre de microrganismos patogênicos; preservação das propriedades agrícolas do lodo; não necessita equipamento especial para ser utilizado na agricultura; pode ser incinerado ou disposto em aterro sanitário e o produto pode ser ensacado e distribuído pelo comércio varejista (GONÇALVES *et al.*, 2001).

Outra vantagem é a possibilidade de uso do lodo seco como biossólido e condicionador de solos agrícolas e florestais, ou como material combustível para incineradores de resíduos ou de fornos da indústria cimenteira, devido ao alto poder calorífico (SCHROEDER e VOLSCHAN JR., 2011).

#### **2.4.6. Oxidação úmida**

A oxidação úmida é uma técnica utilizada para o tratamento de águas residuárias e de lodos. Contrariamente à incineração, que realiza a oxidação na fase gasosa, a oxidação úmida é um processo pelo qual a oxidação da matéria orgânica do lodo de águas residuárias ocorre na fase líquida. Isto é conseguido a temperaturas moderadas de 125-320 °C e a pressões na faixa de 5-200 bar, para evitar que a água evapore, em que o agente oxidante é o oxigênio fornecido pelo ar ou o oxigênio puro (CHAUZY *et al.*, 2010). As unidades atualmente em operação em estações de tratamento de esgotos utilizam o ar comprimido como agente oxidante (LUDUVICE e FERNANDES, 2001).

O processo pode tratar qualquer tipo de resíduo orgânico aquoso, até mesmo tóxico, produzido por vários ramos da atividade industrial, ou pode ser acoplado a uma instalação de tratamento biológico para eliminar o lodo. A oxidação úmida é um dos poucos processos que não transformam uma forma de poluição em outra, mas que a fazem realmente desaparecer (DEBELLEFONTAINE e FOUSSARD, 2000).

#### **2.4.7. Pasteurização**

A pasteurização baseia-se no fato de que vírus, helmintos, protozoários e bactérias patogênicas são inteiramente destruídos quando o lodo de esgoto é mantido à temperatura de 70 °C, durante um intervalo de tempo de 30 minutos (EPA, 1992).

Uma técnica de pasteurização desenvolvida na África do Sul processa o lodo líquido, com 4% a 8% de sólidos. O lodo é colocado em reatores, onde é realizada injeção de amônia anidra, até a elevação do pH a 11,5. Após uma hora, aproximadamente, há grande redução de microrganismos patogênicos, devido à presença de amônia livre (30%). Em seguida, é feita adição de ácido fosfórico e a reação exotérmica causa elevação da temperatura a 65-70 °C por, aproximadamente, 2 minutos. Esta reação também abaixa o pH para 7,0. Em seguida, o lodo pode ser desidratado. Existem algumas variantes deste método, algumas ainda em fase de estudos (FERNANDES, 2000).

#### **2.4.8. Incineração**

A incineração é um método de tratamento em que se utiliza a decomposição térmica via oxidação, com o objetivo de tornar um resíduo menos volumoso, menos tóxico ou atóxico, ou, ainda, eliminá-lo, convertendo-o em gases ou resíduos incombustíveis. Por meio da incineração, os sólidos voláteis do lodo são queimados na presença de oxigênio, convertendo-os em dióxido de carbono e água, sendo uma parcela de sólidos fixos transformada em cinzas (TSUTYA, 2000).

Segundo Mattioli e Silva (2002), a incineração pode ser utilizada para qualquer tipo de resíduo infectante, reduzindo em 15% o peso e o volume do resíduo, destruindo os organismos patogênicos e as substâncias orgânicas. A geração de energia térmica pode ser reaproveitada no próprio sistema ou convertida para a produção de energia

elétrica. Em sistemas modernos, os gases são exaustivamente filtrados e lavados, retirando-se as partes nocivas e as partículas finas. No entanto, há emissão de efluentes gasosos (dioxinas, furanos e partículas metálicas) expelidos pelas chaminés em incineradores projetados inadequadamente, os quais também são operados por pessoal não qualificado, ou devido à composição do resíduo a ser incinerado, a exemplo do PVC. Deve ser incorporado aos incineradores um sistema de tratamento dos gases expelidos no processo, o que ocasiona o aumento do custo final do processo. A variabilidade da composição dos resíduos pode resultar em problemas no manuseio e na operação do incinerador, exigindo manutenção intensa. Os resíduos incinerados requerem pré-aquecimento por meio de combustíveis auxiliares, pois a umidade acentuada dos mesmos dificulta a queima no processo de combustão.

Os lodos destinados à incineração são, geralmente, desaguados e não tratados. Normalmente, é desnecessário estabilizar o lodo antes da incineração. Na verdade, tal prática pode ser prejudicial, pois a estabilização, especificamente a digestão aeróbia e anaeróbia, diminui o conteúdo de compostos voláteis no lodo e, conseqüentemente, aumenta a necessidade de combustível auxiliar (METCALF e EDDY, 2004).

Devido à sofisticação do processo e ao alto custo de implantação e operação, o uso de incinerados no tratamento de lodo está restrito às grandes áreas metropolitanas, com elevada concentração industrial. As restrições ao reuso do lodo na agricultura com alta concentração de metais pesados, a distância entre estas áreas metropolitanas e o campo e as limitações de espaço nos aterros sanitários urbanos contribuem para, nestas condições, viabilizar a incineração como alternativa de tratamento de lodo (LUDUVICE e FERNANDES, 2001).

O controle da emissão atmosférica de um incinerador é obtido por meio da otimização do processo de combustão e da utilização de filtros, antes da liberação do efluente para a atmosfera. Os principais poluentes liberados durante a queima são os óxidos de nitrogênio, os produtos da combustão incompleta (monóxido de carbono, dioxinas, furanos, etc.), os gases ácidos (dióxido de enxofre, ácido clorídrico e ácido fluorídrico) e os compostos orgânicos voláteis (LUDUVICE e FERNANDES, 2001)

Esse tipo de tratamento não pode ser considerado como destinação final do lodo devido à cinza residual, que exige adequada disposição final.

#### 2.4.8.1. Coincinação – incinação conjunta com resíduos sólidos urbanos

A coincinação do lodo de esgoto com resíduos sólidos urbanos é realizada com o objetivo reduzir os custos combinados da incinação do lodo e dos resíduos sólidos. O processo tem as vantagens de produzir energia térmica necessária para evaporar a água do lodo, suportar a combustão dos resíduos sólidos e do lodo e proporcionar um excesso de calor para a geração de vapor, se desejado, sem o uso de combustíveis fósseis auxiliares. Em sistemas projetados corretamente, os gases quentes do processo podem ser utilizados para remover a umidade do lodo a um valor de 10% a 15% (METCALF e EDDY, 2004).

#### 2.4.9. Pirólise

A pirólise pode ser definida como a degradação térmica de qualquer material orgânico na ausência parcial ou total de um agente oxidante ou, até mesmo, em um ambiente com uma concentração de oxigênio capaz de evitar a gaseificação intensiva do material orgânico. A pirólise, geralmente, ocorre a uma temperatura que varia desde os 400 °C até o início do regime de gaseificação (PEDROZA *et al.*, 2010).

Considerando que o lodo de ETE contém material predominantemente carbonáceo, o mesmo se apresenta como matéria-prima potencial para a produção de gases combustíveis ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_n\text{H}_n$ ) por pirólise. Do ponto de vista de tratamento e disposição, a pirólise se apresenta como uma alternativa interessante, uma vez que efetua a redução do lodo a uma taxa quase equivalente à da incinação e o balanço de energia é altamente vantajoso, pelo fato de gerar combustível gasoso ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_n\text{H}_n$ ), líquido (óleo) e sólido (carvão). Devido ao fato de a pirólise processar-se a baixas temperaturas, a formação de dioxinas e furanos fica impedida, mesmo que haja presença de hidrocarbonetos clorados e aromáticos (TSUTYA, 2000).

A pirólise gera produtos, tais como óleo, gases e carbono fixo, que podem ser utilizados como combustíveis ou matéria-prima para a indústria petroquímica. Além disso, os metais pesados (mercúrio e cádmio) poderiam ser facilmente incluídos no carvão (KARAYILDIRIM *et al.*, 2006).

#### **2.4.10. Gaseificação**

A tecnologia de gaseificação é a conversão de qualquer combustível líquido ou sólido, como a biomassa, em um gás energético, por meio da oxidação parcial, à temperatura elevada. Esta conversão, realizada em gaseificadores, produz um gás combustível que pode ser utilizado tanto em turbina a gás quanto em queimadores de caldeiras para a geração de vapor.

O gás produzido tem muitas aplicações práticas, que vão desde a combustão em motores ou em turbinas, para a geração de potência, energia elétrica, em bombas de irrigação, para a geração direta de calor, ou como matéria-prima na síntese química da amônia e do metano (SÁNCHEZ, LORA e GÓMEZ, 2008).

A gaseificação é uma alternativa à incineração para o tratamento térmico de lodo de esgoto.

A técnica de gaseificação tem todas as vantagens da incineração para o tratamento de lodo de esgoto, incluindo a completa estabilização do lodo e a redução da massa para a mínima possível de cinzas. Além disso, a gaseificação pode contornar os problemas comumente encontrados na incineração, como a necessidade de combustível adicional, as emissões de óxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio, metais pesados e cinzas voláteis, e o potencial de produção de dibenzodioxinas cloradas e dibenzofuranos (JAEGER e MAYER, 2000).

#### **2.5. Densificação**

O processo de densificação da biomassa consiste na aplicação de pressão em uma massa de partículas dispersas, com o objetivo de torná-las um sólido geométrico compacto de alta densidade e transformando-o em um produto de alto valor combustível.

Os processos comerciais de densificação de biomassa, de acordo com Migliorini (1980), são:

- peletização: utilizado na manufatura de rações, emprega uma matriz de aço perfurada com um denso arranjo de orifícios de 0,3 a 1,3 cm de diâmetro. A matriz gira e a pressão interna dos cilindros força a passagem da biomassa

através dos orifícios, com pressões de  $7,0 \text{ kg}\cdot\text{mm}^{-3}$ . O pelete então formado é cortado por facas ajustadas ao comprimento desejado;

- cilindros ou cubos: modificação da peletização, que produz grandes cilindros ou cabos de 2,5 a 5 cm de diâmetro;
- briquetagem: processo mais utilizado para a compactação de resíduos agroflorestais, objetivando a produção de combustíveis sólidos;
- extrusão: utiliza uma rosca para forçar a biomassa sob alta pressão contra uma matriz, formando grandes cilindros de 2,5 a 10 cm de diâmetro. Agentes ligantes, como piche ou parafina, são frequentemente adicionados para aumentar a força estrutural e o poder calorífico.

### **2.5.1. Briquetagem**

A densificação do resíduo por meio do processo de briquetagem consiste na compactação do mesmo, sob alta pressão e temperatura, com ou sem a adição de aglutinantes, dando origem a um produto de elevada densidade e dimensões padronizadas.

Todos os tipos de resíduos orgânicos podem ser briquetados, sendo necessário, apenas, colocá-los numa granulometria e em um teor de umidade adequados ao processo de densificação (QUIRINO, 2012).

Segundo Bhattacharya, Leon e Rahman (2002), a umidade ideal para a briquetagem dos resíduos deve estar compreendida entre 8% a 12%. Um excesso de umidade pode provocar explosões, devido à formação de vapor. Por outro lado, uma matéria-prima muito seca dificulta os mecanismos de ligação entre as partículas (FILIPPETTO, 2008).

A matéria-prima ideal deveria ser composta por uma mistura de partículas de vários tamanhos, sendo a medida máxima dependente do tipo de material e do diâmetro da matriz. Geralmente, é aceitável a dimensão entre 8 e 10 mm, enquanto grandes prensas com matrizes de 125 mm aceitam partículas de até 15 mm. O tamanho inicial das partículas influencia também a densidade final dos briquetes. Matéria-prima de baixa granulometria resulta em briquetes muito densos, mas requer pressões e temperaturas muito elevadas para aglomerar as partículas sem adição de ligantes (ERIKSSON e PRIOR, 1990).

Segundo o Instituto de Tecnologia do Paraná (TECPAR) (2005), o briquete é uma lenha ecológica adequada para uso, que substitui com grande eficiência a lenha comum, o óleo combustível, o gás, a energia e outros. Alternativa atual de energia, com os altos preços dos combustíveis e a preocupação com o meio ambiente, o briquete se tornou uma solução prática e viável, com ótimo custo/benefício, trazendo excelente economia, rentabilidade e garantia no fornecimento. O briquete é utilizado na produção de energia, na forma de calor, em caldeiras, fornos, churrasqueiras e lareiras. Para ser ter uma ideia, cerca de 30 kg de briquetes geram o equivalente a  $100 \text{ kWh.mês}^{-1}$  de energia elétrica convencional.

### **2.5.2. Principais propriedades dos briquetes**

A qualidade dos briquetes é diretamente influenciada pelas propriedades físicas e químicas da matéria-prima utilizada, como, por exemplo, o poder calorífico, o tamanho das partículas e a densidade, bem como os parâmetros de produção (RODRIGUES, 2010).

Após a fabricação do briquete, é necessário garantir a sua qualidade e, para isso, avalia-se uma série de parâmetros, como resistência à compressão, teor de umidade, teor de matéria volátil, teor de cinzas, teor de carbono fixo, massa específica e poder calorífico.

Resistência à compressão é o ensaio que determina a resistência do briquete aos esforços compressivos, durante a sua estocagem (CARVALHO e BRINCK, 2004). A umidade influencia consideravelmente o poder calorífico do resíduo, bem como a sua resistência. Elevado teor de umidade pode acarretar inchamento e posterior ruptura do briquete. Os materiais voláteis têm papel importante durante a ignição e as etapas de combustão da biomassa (CORTEZ, LORA e GÓMEZ, 2008). As cinzas são substâncias inorgânicas que não se queimam, portanto, não produzem calor, reduzindo o poder calorífico, caso ocorra o aumento desta substância no combustível. O carbono fixo refere-se à fração de material que se queima no estado sólido e o poder calorífico é a propriedade mais importante de um combustível, podendo ser definida como a quantidade de energia liberada pelo combustível durante a queima completa.

### **2.5.3. Vantagens e desvantagens do uso de briquetes**

O uso dos briquetes apresenta uma série de vantagens, se eles forem comparados aos combustíveis sólidos convencionais. Bhattacharya, Leon e Rahman (2002) destacam, como principais vantagens, aumento do conteúdo calorífico do material por unidade de volume, maior facilidade de transporte e estocagem, produz uma queima uniforme e de qualidade, e solução para disposição de resíduos. Além disso, o processo de briquetagem também ajuda a reduzir o desmatamento por meio de um substituto do uso da lenha para fins energéticos.

As desvantagens são a necessidade de altos investimentos em equipamentos, gastos de energia no processo, algumas características indesejáveis na combustão observadas, algumas vezes, como tendência em se desmancharem quando expostos à água ou submetidos à alta umidade e alta carga tributária incidente na venda do produto e nos equipamentos utilizados (SILVA, 2007).

Outro aspecto a ser considerado é que, dependendo das características químicas dos resíduos a serem briquetados, pode haver restrições ao seu uso para este fim, dado que as emissões atmosféricas e/ou a constituição das cinzas geradas após sua queima podem ser danosos à saúde e ao ambiente. Entretanto, a constituição química destes resíduos pode ser um ponto positivo, uma vez que as cinzas não contaminadas destes resíduos podem apresentar potencial como fertilizante para solos.

### **2.6. Companhia Industrial Cataguases**

A Companhia Industrial Cataguases (CIC), fundada em 1936, está localizada no município de Cataguases, na Zona da Mata Mineira, nas coordenadas 21° 23' 17" Sul e 42° 41' 57" Oeste (Figura 2.3).



Figura 2.3 – Localização do município de Cataguases  
 Fonte: Companhia Industrial Cataguases (2012)

### 2.6.1. Processo produtivo da Companhia Industrial Cataguases

O processo produtivo da Companhia Industrial Cataguases inicia-se com a fiação das fibras. A indústria utiliza o algodão como matéria-prima e os três tipos de fiação, cardada, penteada e *open end*, para a fabricação dos fios. Após a fiação, os fios são encaminhados à tecelagem, onde serão transformados em tecidos. Por último, há o beneficiamento, em que os tecidos serão transformados em tecidos fio tinto, tinto liso, estampado e megamix.

Nos tecidos fios tintos, é o próprio fio que recebe o tingimento, antes mesmo de ser tecido, o que garante maior durabilidade e vivacidade da cor. Os tecidos tintos lisos são aqueles que recebem uma coloração única em toda a sua extensão, possuindo um aspecto uniforme e sem estampa. Tecidos estampados são aqueles que, após a tecelagem, recebem, no acabamento, a aplicação de desenhos variados e decorativos, com uma ou mais cores apenas do lado direito do tecido. Na CIC, estes tecidos são fabricados pelo processo de estamparia rotativa. São direcionados a várias aplicações, como desenho e decoração infantil, minidesenhos geométricos e gravataria, florais femininos e infantil, desenhos havaianos, linha *surfwear* e desenhos natalinos.

## 2.6.2. Geração de resíduos na Companhia Industrial Cataguases

Na Figura 2.4 observa-se o processo produtivo da indústria, bem como a geração de resíduos em cada etapa de fabricação.

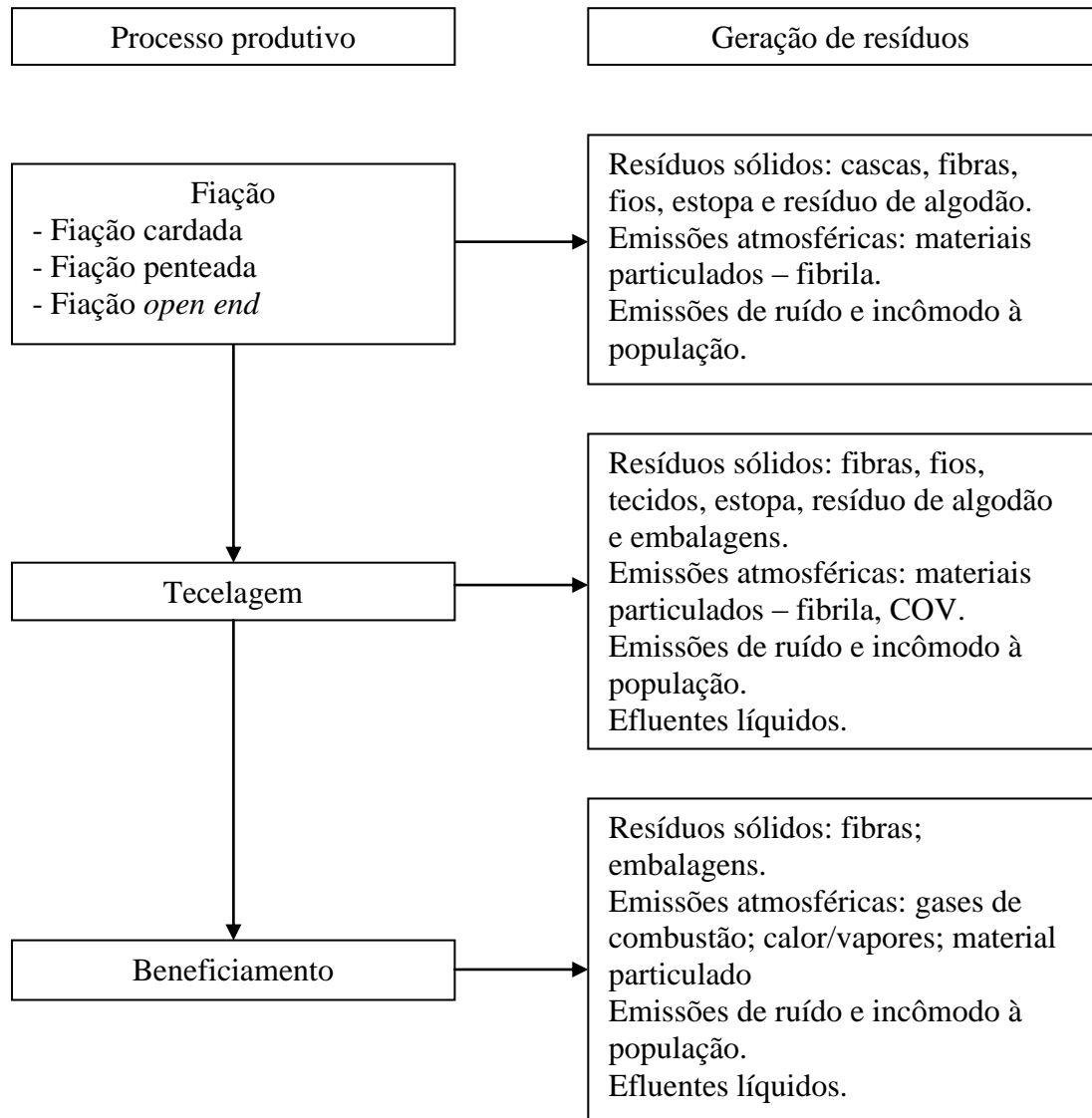


Figura 2.4 – O processo produtivo e a geração de resíduos na Companhia Industrial Cataguases

Os resíduos sólidos gerados são provenientes de toda a empresa e os mais variados possíveis. Os principais são resíduos de algodão, sucata de ferro, sucata de plástico, sucata de papel, lâmpadas, óleo lubrificante usado, lodo da estação de tratamento de efluentes e demais resíduos em geral (“lixo doméstico”).

O resíduo de algodão, que representa aproximadamente 70% do total de resíduos sólidos produzidos, e o lodo biológico são encaminhados para aterro industrial localizado na cidade de Juiz de Fora.

Os demais resíduos sólidos são classificados quanto à sua periculosidade, a fim de se definir a destinação final adequada para cada um deles. Para que não sejam misturados e prejudiquem todo o ecossistema envolvido, a indústria mantém uma área de coleta dos resíduos sólidos, dividida em diversos boxes independentes que recebem os resíduos segregados.

A água residuária é tratada na estação de tratamento de efluentes da própria indústria. O método consiste em um tratamento preliminar seguido de tratamento biológico (sistema de lodos ativados) e o lodo gerado é encaminhado para adensamento e centrifugação (Figuras 2.5 e 2.6).

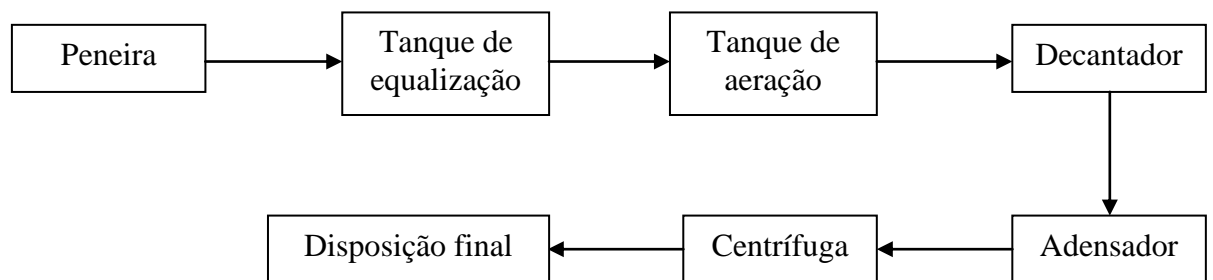


Figura 2.5 – Fluxograma da estação de tratamento de efluentes

O efluente industrial apresenta DBO de entrada de  $800 \text{ mg.L}^{-1}$  e de saída, entre  $40$  e  $50 \text{ mg.L}^{-1}$ . As DQOs de entrada e saída são de  $2.100 \text{ mg.L}^{-1}$  e  $147 \text{ mg.L}^{-1}$ , respectivamente.



Figura 2.6 – Estação de tratamento de efluentes: (a) peneira; (b) tanque de equalização; (c) tanque de aeração; (d) decantador; (e) adensador de lodo; (f) centrífuga

Os resíduos atmosféricos são oriundos das unidades de geração de vapor que são utilizadas, principalmente, no processo de acabamento do tecido. Esta geração utiliza a queima do óleo combustível para a produção de calor necessárias. Como consequência desta queima do óleo, geram-se gases de combustão, material particulado e vapor d'água. Estes gases e vapores são neutralizados por meio de um tratamento com torres lavadoras de gases.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AISSE, M. M.; FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. Aspectos tecnológicos e processos. In: ANDREOLI, C. V.; LARA, A. I.; FERNANDES, F. **Reciclagem de biossólidos. Transformando problemas em solução**. 2. ed. Curitiba: Sanepar, Finep, 2001. p. 49-119.

ALCÂNTARA, M. R.; DALTIM, D. A química do processamento têxtil. **Química Nova**, v. 19, n. 3, p. 320-330, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: NBR 10.004: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

BASTIAN, E. Y. O.; ROCCO, J. L. S. **Guia técnico ambiental da indústria têxtil – Série P + L**. São Paulo: CETESB, Sinditêxtil, 2009. 81 p.

BHATTACHARYA, S. C.; LEON, M. A.; RAHMAN, M. M. A study on improved biomass briquetting. **Energy for Sustainable Development**, v. 1, n. 2, p. 67-71, jun. 2002.

CARVALHO, E. A. D.; BRINCK, V. **Briquetagem**. In: Tratamento de minérios. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2004. p. 613-636.

CHAUZY, J.; MARTIN, J. C.; CRETENOT, D.; ROSIERE, J. P. Wet air oxidation of municipal sludge: return experience of the north Brussels waste water treatment plant. **Water Practice & Technology**, v. 5, n. 1, p. 1-8, 2010.

CHÁVEZ, G. M.; TOSCANO, C. F.; MÁRQUEZ, R. L. Aplicación del procesamiento termico y alcalino para la desinfección de lodos residuales primarios. Un estudio comparativo. In: CONGRESSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, XXVII., 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 2000. p. 1-5.

COMPANHIA INDUSTRIAL CATAGUASES. Disponível em: <<http://www.cataguases.com.br/>>. Acesso em: 10 jan. 2012.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S.; GÓMEZ, E. O. Caracterização da biomassa. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S.; GÓMEZ, E. O. (Orgs.). **Biomassa para energia**. Campinas: Editora da Unicamp, 2008. p. 31-62.

COSTA, A. C. R. D.; ROCHA, E. R. P. D. **Panorama da cadeia produtiva têxtil e de confecções e a questão da inovação**. Rio de Janeiro: BNDES Setorial, 2009. p. 160-202.

COSTA, A. F. S. **Aplicação de tratamentos biológicos e físico-químico em efluentes de lavanderia e tinturaria industriais do município de Toritama no estado de Pernambuco**. 2008. 87 p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais) – Universidade Católica do Pernambuco, Recife, 2008.

DAVID, A. C. **Secagem térmica de lodo de esgoto. Determinação da umidade de equilíbrio**. 2002. 151 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

DEBELLEFONTAINE, H.; FOUSSARD, J. N. Wet air oxidation for the treatment of industrial wastes. Chemical aspects, reactor design and industrial applications in Europe. **Waste Management**, v. 20, p. 15-25, 2000.

ERIKSSON, S.; PRIOR, M. The briquetting of agricultural wastes for fuel. Roma: FAO, 1990. 131 p.

FERNANDES, F. Estabilização e higienização de biossólidos. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Eds.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. p. 45-68.

FERNANDES, F.; SOUSA, S. G. Estabilização de lodo de esgoto. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, tratamento e disposição final**. Curitiba: ABES – PROSAB, 2001. p. 29-55.

FILIPPETTO, D. **Briquetagem de resíduos vegetais: viabilidade técnico-econômica e potencial de mercado**. 2008. 61 p. Dissertação (Mestrado em Planejamento de sistemas energéticos) – Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2008.

FREITAS, K. R. D. **Caracterização e reuso de efluentes do processo de beneficiamento da indústria têxtil**. 2002. 151 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

GONÇALVES, R. F.; LUDUVICE, M.; LIMA, M. R. P.; RAMALDES, D. L. DA C.; FERREIRA, A. C.; TELES, C. R.; ANDREOLI, C. V. Desidratação de lodos de esgotos. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, tratamento e disposição final**. Curitiba: ABES – PROSAB, 2001a. p. 57-86.

GONÇALVES, R. F.; LUDUVICE, M.; VON SPERLING, M. Remoção da umidade de lodos de esgotos. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Eds.). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: UFMG, SANEPAR, v. 6, 2001b. p. 159-259.

GORINI, A. P. F.; SIQUEIRA, S. H. G. D. **O segmento de fiação no Brasil**. Banco Nacional do Desenvolvimento – BNDES, 1997.

HASSEMER, M. E. N. **Oxidação fotoquímica – UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> – para degradação de poluentes da indústria têxtil**. 2006. 175 p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

HASSEMER, M. E. N.; SENS, M. L. Tratamento do efluente de uma indústria têxtil. Processo físico-químico com ozonônio e coagulação/floculação. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 7, n. 1 p. 30-36, 2002.

HEINSS, U.; KOOTTATEP, T. **Use of reed beds for faecal sludge dewatering**. Thailand: Swiss Federal Institute for Environmental Science & Technology – EAWAG, Department for Water and Sanitation in Developing Countries – SANDEC, 1998.11 p.

INSTITUTO DE TECNOLOGIA DO PARANÁ. **Formulário de Resposta Técnica**. 2005.

JAEGER, M.; MAYER, M. The Noell conversion process – a gasification process for the pollutant-free disposal of sewage sludge and the recovery of energy and materials. **Water Science and Technology**, v. 41, n. 8 p. 37-44, 2000.

JORDÃO, E. P.; PÊSSOA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 4. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2011. 969 p.

KARAYILDIRIM, T.; YANIK, J.; YUKSEL, M.; BOCKHORN, H. Characterisation of products from pyrolysis of waste sludges. **Fuel**, v. 85, p. 1498-1508, 2006.

LUDUVICE, M. Processos de estabilização de lodos. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Eds.). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: UFMG, SANEPAR, v. 6, 2001 p. 123-157.

LUDUVICE, M.; FERNANDES, F. Principais tipos de transformação e descarte do lodo. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Eds.). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: UFMG, SANEPAR, v. 6, 2001. p. 399-423.

MALTA, T. S. **Aplicação de lodos de estações de tratamento de esgotos na agricultura: estudo do caso do município de Rio das Ostras – RJ**. 2001. 57 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Saúde Pública) – Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública, Rio de Janeiro, 2001.

MARTINS, G. B. H. **Práticas limpas aplicadas às indústrias têxteis de Santa Catarina**. 1997. 126 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

MATTIOLI, C. E.; SILVA, C. L. Avaliação de parâmetros na implantação de processos para tratamento de resíduos sólidos de serviços de saúde. In: SIMPÓSIO ÍTALO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, VI., 2002, Vitória. **Anais...** Vitória: ABES, 2002. p. 1-10

METCALF E EDDY. **Wastewater engineering: treatment, disposal, reuse**. 4. ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2004. 1819 p.

MIGLIORINI, A. J. Densificação de biomassa florestal. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 1, n. 2. p. C.1 - C.9, jul. 1980.

MIKI, M. K. **Utilização de polímeros para condicionamento de lodo de ETE para desidratação em filtro prensa de placas**. 1998. 405 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

MIKI, M. K.; ALÉM SOBRINHO, P.; VAN HAANDEL, A. C. Tratamento da fase sólida em estações de tratamento de esgotos – condicionamento, desaguamento mecanizado e secagem térmica do lodo. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Alternativas**

**de uso de resíduos do saneamento.** Rio de Janeiro: ABES - PROSAB, 2006. p. 49-107.

MÜEZZINOGLU, A. Air pollutant emission potentials of cotton textile manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v. 6, p. 339-347, 1998.

PEDROZA, M. M.; VIEIRA, G. E. G.; SOUSA, J. F.; PICKLER, A. C.; LEAL, E. R. M.; MILHOMEN, C. C. Produção e tratamento de lodo de esgoto – uma revisão. **Revista Liberato**, v. 11, n. 16, p. 89-188, 2010.

QUIRINO, W. F. **Utilização energética de resíduos vegetais.** Laboratório de Produtos Florestais LPF/IBAMA, 2012. 35 p. Disponível em: <<http://www.mundoflorestal.com.br/arquivos/aproveitamento.pdf>>. Acesso em: 27 mai 2012.

RODRIGUES, V. A. J. **Valorização energética de lodo biológico da indústria celulósica através da briquetagem.** 2010. 117 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

SÁNCHEZ, C. G.; LORA, E. S.; GÓMEZ, E. O. Gaseificação: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S.; GÓMEZ, E. O. (Orgs.). **Biomassa para energia.** Campinas: Editora da Unicamp, 2008. p. 241-332.

SCHROEDER, P.; VOLSCHAN JR., I. Influência econômica da eficiência da secagem térmica sobre a disposição final do lodo de esgotos em aterro sanitário. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 26., 2011, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ABES, 2011. p. 1-8.

SILVA, C. A. D. **Estudo técnico-econômico da compactação de resíduos madeiros para fins energéticos.** 2007. 68 p. Dissertação (Mestrado em Planejamentos de Sistemas Energéticos) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

SILVA, T. L. D.; CAMPOS, R. V. D. M. Alternativas de aplicação das práticas de produção mais limpa (P+L) em fiações têxteis. In: ENCONTRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO AGROINDUSTRIAL, IV., 2010, Campo Mourão. **Anais...** Campo Mourão: UEPR, 2010. p. 1-8

SOARES, J. L. **Remoção de corantes têxteis por adsorção em carvão mineral ativado com alto teor de cinzas**. 1998. 82 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

SOUZA, C. R. L. D.; PERALTA-ZAMORA, P. Degradação de corantes reativos pelo sistema ferro metálico/peróxido de hidrogênio. **Química Nova**, v. 28, n. 2, p. 226-228, 2005.

SOUZA, F. A. D. **Gestão de estoques em indústrias de fios têxteis**. 2009. 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2009.

TSUTYA, M. T. Alternativas de disposição final de biossólidos em estações de tratamento de esgotos. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Eds.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. p. 69-105.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge under 40 CFR Part 503**. Cincinnati, USA, 1992.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Best Management practices for pollution prevention in the textile industry**. Cincinnati, USA, 1996.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Profile of textile industry**. Washington, USA, 1997.

VASQUES, A. R. **Caracterização e aplicação de adsorventes para remoção de corantes de efluentes têxteis em batelada de colunas de leito fixo**. 2008. 153 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005. v. 1. 452p.

VON SPERLING, M.; ANDREOLI, C. V. Introdução. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Eds.). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: UFMG, SANEPAR, 2001. p. 13-16.

### **3. CAPÍTULO 2: CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DA INDÚSTRIA TÊXTIL PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA**

#### **RESUMO**

AVELAR, Nayara Vilela. M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2012. **Caracterização de resíduos sólidos da indústria têxtil para a geração de energia.** Orientadora: Ana Augusta Passos Rezende. Coorientadores: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, Cláudio Mudado Silva e Ann Honor Mounteer.

Os resíduos provenientes da indústria têxtil, resíduo de algodão e lodo biológico oriundo do tratamento de efluentes por lodos ativados, foram classificados e caracterizados por análise química elementar (CHONS), materiais voláteis, carbono fixo e teor de cinzas, poder calorífico superior (PCS), inferior (PCI) e útil (PCU), análise de inorgânicos (Ca, Mg, Zn, Fe, Mn e Cu), densidade a granel e densidade energética. Seu comportamento térmico foi estudado por análise termogravimétrica (TGA), a fim de se avaliar o potencial dos resíduos como combustíveis na geração de energia. As amostras foram classificadas como resíduos não perigosos e não inertes (Classe II A), pela NBR 10.004. O lodo biológico apresentou maiores teores de CHNS, materiais voláteis, carbono fixo e de cinzas, densidade a granel e densidade energética, em relação ao resíduo de algodão. Os poderes caloríficos superior, inferior e útil do lodo biológico apresentaram valores médios de 22, 20 e 18 MJ.kg<sup>-1</sup>, respectivamente; já no resíduo de algodão, esses valores foram de 18, 17 e 15 MJ.kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Estes resultados estão, em média, dentro da faixa obtida de outros resíduos utilizados para a geração de energia. O lodo biológico, devido à utilização de pigmentos e corantes na indústria, apresentou altos teores de cobre, ferro e zinco, e o resíduo de algodão apresentou maiores teores de ferro, manganês e zinco, devido aos produtos químicos utilizados durante a produção do algodão. Conforme os resultados de TGA, o lodo biológico apresentou massa residual lodo superior ao do resíduo de algodão, devido ao maior percentual de inorgânicos presentes neste resíduo. As cinzas dos resíduos foram classificadas como resíduos perigosos (Classe I), pela NBR 10004 (ABNT, 2004a), sendo necessário o correto tratamento e destinação final.

Palavras-chave: resíduos industriais; lodo biológico; resíduo de algodão; indústria têxtil; energia.

## ABSTRACT

AVELAR, Nayara Vilela. M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, October 2012. **Characterization of solid waste from the textile industry for energy generation.** Adviser: Ana Augusta Passos Rezende. Co-advisers: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, Cláudio Mudado Silva and Ann Honor Munteer.

The solid waste from a textile mill, as well as the cotton residues and biological sludge from the wastewater treatment plant, were classified and characterized by elementary analysis (CHONS); volatile material content, fixed carbon and ash content; high, lower and net calorific value; inorganic analysis (Ca, Mg, Zn, Fe, Mn and Cu); bulk density and energy density. Their thermal behavior by thermogravimetric analysis (TGA), in order to evaluate the potential of the residues as fuel in the energy generation. The samples were classified as non-hazardous and non-inert wastes (Class II A) according to the NBR 10.004. The biological sludge showed higher contents of CHNS, volatile matter, fixed carbon and ash content, bulk density and energy density, when compared to cotton residue. The higher, lower and net calorific values of the biological sludge showed average values of 20, 19 and 17 MJ.kg<sup>-1</sup>, respectively; for the cotton residue, these values were 18, 17 e 15 MJ.kg<sup>-1</sup>, respectively. These results are, on average, within the range obtained from other wastes used for energy generation. The biological sludge, due to the use of pigments and dyes in the mill, presented high levels of copper, iron and zinc; the cotton residue showed higher contents of iron, manganese and zinc, due to the chemicals used during the production of cotton. According to the TGA's results, the biological sludge showed higher residual mass than waste residue, due to a higher percentage of inorganic present in the sludge. The ashes of the wastes were classified as hazardous waste (Class I), according to the NBR 10004 (ABNT, 2004a), requiring proper treatment and disposal.

Keywords: industrial waste; biological sludge; cotton residue; textile industry; energy.

### 3.1. Introdução

Os resíduos sólidos representam um dos grandes desafios do século XXI, chamando a atenção pelo crescente aumento na sua geração e pelo reconhecido déficit de soluções ambientalmente adequadas quanto à disposição final e/ou reaproveitamento/reciclagem, sendo estas últimas ainda incipientes no Brasil. Além do aumento da quantidade gerada, são descartados, diariamente, no ambiente, resíduos de composições cada vez mais complexas, limitando a capacidade de assimilação destes pelo ambiente natural e tornando ainda mais difíceis e onerosos os processos de reaproveitamento/reciclagem. Somados aos impactos ambientais causados pela disposição inadequada, a geração de resíduos retrata um grande desperdício de matéria-prima e energia.

As indústrias têxteis são grandes geradoras de resíduos, tais como os de algodão e restos de fios e aparas, embalagens de insumos e matérias-primas, materiais de escritório e refeitório, resíduos de varrição, óleo lubrificante, pós, cinzas e lodos dos sistemas de tratamento de efluentes.

O gerenciamento ambiental adequado desses resíduos sólidos permitirá a sua utilização como matéria-prima para outros processos, como, por exemplo, a obtenção de energia, garantindo uma produção sustentável, além da minimização dos impactos ambientais.

A produção de energia térmica e elétrica a partir de biomassa tem sido muito defendida como uma alternativa importante para países em desenvolvimento (ANEEL, 2012). Sistemas de cogeração que permitem produzir, simultaneamente, energia elétrica e calor útil, configuram uma das tecnologias mais racionais para a utilização de combustíveis.

As biomassas mais comuns para uso em cogeração são os resíduos agrícolas. O uso de lodos de estações de tratamento de efluentes como combustível alternativo na cogeração de energia vem sendo estudado por diversos autores, porém, seu emprego ainda não está bem difundido (BORGES *et al.*, 2008).

Em se tratando de reaproveitamento energético de resíduos, para que seu uso seja economicamente viável, são necessários a sua caracterização física e química e o estudo do seu comportamento frente às condições de combustão.

Desse modo, este trabalho foi realizado com o objetivo de caracterizar os resíduos sólidos da indústria têxtil, visando seu uso para a geração de energia. O objetivo específico foi classificar as cinzas provenientes da combustão desses resíduos.

## 3.2. Material e Métodos

### 3.2.1. Classificação e caracterização dos resíduos

Os resíduos estudados compreendem o resíduo de algodão e o lodo biológico, ambos provenientes da Companhia Industrial Cataguases, situada no estado de Minas Gerais. Utilizou-se o resíduo de algodão proveniente das etapas de fiação e tecelagem e o lodo biológico oriundo do sistema de lodos ativados, coletado após a etapa de centrifugação do mesmo. Na Figura 3.1 observa-se uma ilustração representativa de cada resíduo.

Os resíduos foram coletados e amostrados segundo a NBR 10007 (ABNT, 2004d).



Figura 3.1 – Resíduos estudados: (A) lodo biológico; (B) resíduo de algodão.

Inicialmente, realizaram-se as análises de lixiviação e solubilização para a determinação da classe dos resíduos de acordo com as normas NBR 10004 (ABNT, 2004a), NBR 10005 (ABNT, 2004b) e NBR 10006 (ABNT, 2004c) e determinou-se a umidade *in natura* dos resíduos, de acordo com a norma NBR 7993 (ABNT, 1983). Posteriormente, o lodo biológico foi colocado em um pátio, para a redução do teor de umidade inicial, por um período de 14 dias.

Após a secagem, os resíduos foram triturados em moinho de facas e, posteriormente, classificados em peneiras com abertura de 0,42 mm (40 mesh) e 0,25 mm (60 mesh), recolhendo-se a fração que ficou retida na peneira de 60 mesh.

Foram determinados a composição química elementar (carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio); o poder calorífico superior, inferior e útil; a análise química imediata (materiais voláteis, carbono fixo e teor de cinzas); os teores de cálcio, magnésio, zinco, ferro, manganês e cobre; a densidade a granel e a densidade energética, e a análise termogravimétrica.

Os teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio foram determinados via combustão seca, utilizando-se analisador elementar Perkin Elmer, PE-2400, série II. O método consiste em promover a combustão da amostra a 925 °C e analisar os gases liberados por cromatografia gasosa. O teor de enxofre foi obtido por turbidimetria, com o auxílio de um espectrofotômetro, no comprimento de onda 440 nm. O teor de oxigênio foi determinado por diferença entre a soma percentual dos elementos da composição elementar (C, H, N, S), incluindo o teor de cinzas e 100.

Foram determinados os teores de cálcio, magnésio, zinco, ferro, manganês e cobre, por espectrofotometria de absorção atômica. O teor de boro foi quantificado por colorimetria, utilizando-se azometina-H.

As análises termogravimétricas foram realizadas em um termoanalisador Automatic Multiple Sample Thermogravimetric Analyzer TGA-1000. As amostras foram submetidas ao analisador térmico sob atmosfera em meio inerte usando nitrogênio, taxa de aquecimento de 10 °C por minuto e temperatura final de 400 °C.

Os procedimentos para a análise química imediata (materiais voláteis, carbono fixo e teor de cinzas) basearam-se na norma NBR 8112 (ABNT, 1986).

O poder calorífico superior foi obtido experimentalmente por meio do método da bomba calorimétrica adiabática, de acordo com a norma ASTM D2015 (ASTM, 1982). Já os poderes caloríficos inferior e útil foram obtidos por meio das expressões a seguir.

$$PCI = PCS - [600(9H/100)] \quad (1)$$

PCS = poder calorífico superior (kcal.kg<sup>-1</sup>)

H = teor de hidrogênio da biomassa (%)

Sendo W a umidade e PCI, o poder calorífico inferior obtido pela equação 1.

$$PCU = PCI(1 - W) - (600W) \quad (2)$$

PCU = poder calorífico útil ( $\text{kcal.kg}^{-1}$ )

Para a determinação da densidade a granel, utilizou-se a norma NBR 6922 (ABNT, 1981). A densidade energética foi determinada por meio de cálculo, sendo o produto do poder calorífico inferior com a densidade a granel (PINHEIRO *et al.*, 2005).

Os dados foram analisados estatisticamente, por meio da comparação entre a variância de duas amostras, pelo teste F.

### **3.2.2. Classificação das cinzas**

As cinzas provenientes da combustão dos resíduos foram classificadas quanto à periculosidade, de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004a).

Para a determinação da classe em que se enquadram as cinzas dos resíduos, realizaram-se os testes de lixiviação e solubilização, conforme as normas NBR 10005 (ABNT, 2004b) e NBR 10006 (ABNT, 2004c), respectivamente.

## **3.3. Resultados e Discussão**

### **3.3.1. Classificação dos resíduos**

Os parâmetros inorgânicos da amostra de extrato lixiviado situaram-se abaixo dos limites estabelecidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004a) e, sendo assim, os resíduos foram classificados como resíduos Classe II, ou seja, não perigosos (Anexo 1). Observou-se, também, que o solubilizado apresentou resultados acima dos valores máximos permissíveis, conforme a listagem do Anexo G da NBR 10004 (ABNT, 2004a), que caracteriza os resíduos como resíduos não inertes, resíduos Classe II A (Anexo 1).

Os metais (Ba, Pb, Cr total e Fe), o cloreto, o fenol, o fluoreto e o nitrato encontrados no lodo biológico devem-se aos produtos utilizados no processo de tratamento de efluentes, bem como aos corantes e pigmentos utilizados nos processos têxteis.

No resíduo de algodão foram encontrados metais (Al, Cr total, Fe, Mn e Zn) e sulfatos provenientes dos produtos químicos utilizados durante o processo de tecelagem.

Em estudos realizados por Ramos *et al.* (2009), Fernandes *et al.* (2007), Rosa *et al.* (2006), o lodo de diversas indústrias têxteis também foram classificados como resíduos Classe II A, não perigosos e não inertes, podendo ser descartados em aterros sanitários.

### 3.3.2. Propriedades físicas e químicas dos resíduos

Na Tabela 3.1 são apresentados os valores médios de teor de umidade dos resíduos provenientes da indústria têxtil.

Tabela 3.1 – Umidade dos resíduos, lodo biológico e resíduo de algodão

Parâmetro		Resíduo	
		Lodo biológico	Resíduo de algodão
Umidade <i>in natura</i> (após centrifugação)	Média* (%)	90	9,0
	Desvio ( $\pm$ %)	0,04	0,36
Umidade após secagem (secagem ao ar livre)	Média* (%)	8,2	-
	Desvio ( $\pm$ %)	0,35	-

\* média de 3 repetições

O lodo biológico *in natura* apresentou alto teor de umidade (90%), sendo, portanto, essencial a sua secagem prévia, para viabilizar seu uso energético, pois uma alta umidade implica em baixo poder calorífico. O teor de umidade encontrado no resíduo de algodão (9,0%) e no lodo biológico, após a secagem ao ar livre (8,2%), pode ser considerado relativamente baixo e adequado para a combustão.

Na Tabela 3.2 apresentam-se os valores médios de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio dos resíduos.

Tabela 3.2 – Composição química elementar dos resíduos da indústria têxtil

Resíduo	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)	Cinzas (%)
Lodo biológico	46,7 a	6,54 a	6,19 a	1,32 a	27,5 b	11,8 a
Resíduo de algodão	41,4 b	5,91 b	1,06 b	0,42 b	42,3 a	8,93 b

Com a finalidade de realizar estudos de viabilidade técnica do uso dos resíduos para a geração de energia, torna-se necessário conhecer a sua composição, em termos de carbono e hidrogênio e a quantificação dos teores de nitrogênio e enxofre serve para estimar a quantidade de gases NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub> que poderão ser gerados no processo de queima (LEE e SANTOS, 2011).

Observa-se, pelos dados da Tabela 3.2, que o lodo biológico apresentou os maiores percentuais de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre, em relação ao resíduo de algodão. O resíduo de algodão apresentou, na sua constituição, maior percentual de oxigênio. De acordo com Rodrigues (2010), o carbono, o hidrogênio e o enxofre são elementos que contribuem positivamente para a liberação de energia durante o processo de combustão, enquanto o oxigênio contribui negativamente como componente combustível. No entanto, a autora ressalta que a presença de oxigênio na biomassa contribui para as reações de oxidação, agindo como comburente.

Borges *et al.* (2008) verificaram teores de carbono (27,2%), hidrogênio (4%), nitrogênio (2,9%) e enxofre (0,9%) menores que os obtidos neste trabalho, estudando lodos da indústria têxtil. Essas diferenças são devido às características intrínsecas de cada processo de fabricação gerador de lodo. Os autores ressaltam que, devido à presença de matéria orgânica no lodo de esgoto, este, normalmente, apresenta alta concentração de carbono em sua composição. No entanto, segundo Borges *et al.* (2008), o baixo teor desse elemento (27,5%) pode estar relacionado à existência de diferentes pontos de coleta de efluentes espalhados pela área de cobertura da rede coletora que abrange regiões industriais, contribuindo para a redução do teor de matéria orgânica na constituição final do lodo da estação de tratamento de efluente sanitário.

Rodrigues (2010), estudando lodo de indústria de celulose e papel, obteve valores de carbono (32,7%) e hidrogênio (5,6%) inferiores aos observados neste trabalho. De acordo com a autora, a composição química elementar do lodo é variável, pois está diretamente relacionada com a composição celular e com alguns materiais não degradados durante o tratamento dos efluentes, e o teor de enxofre (1,6%) origina-se, principalmente, dos produtos químicos do licor branco utilizado durante o cozimento dos cavacos.

Na Tabela 3.3 apresentam-se os resultados da análise termogravimétrica (TGA) das amostras de lodo biológico e resíduo de algodão.

Tabela 3.3 – Análise termogravimétrica dos resíduos, do lodo biológico e do resíduo de algodão

Resíduo	Perda de massa (%)	Massa residual (%)
Lodo biológico	46,48 b	53,52 a
Resíduo de algodão	59,65 a	40,34 b

Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste F.

Observa-se que a massa residual do lodo foi superior ao do resíduo de algodão. Isto se deve ao maior percentual de inorgânicos presente neste resíduo. A maior degradação térmica ocorreu para o resíduo de algodão, devido, provavelmente, ao percentual de celulose presente, pois a máxima perda de massa da celulose encontra-se na faixa de 325 a 375 °C.

Corradini *et al.* (2009), analisando o comportamento de degradação térmica de fibras de algodão, mencionam que a celulose degrada entre as temperaturas de 310 e 360 °C.

Borges *et al.* (2008) verificaram que uma maior degradação térmica de lodo têxtil ocorreu na faixa de temperatura entre 160 e 410 °C, durante a qual foram observadas perdas de, aproximadamente, 24%. Ressalta-se que, nesta fase, ocorre, principalmente, a degradação de polímeros orgânicos presentes provenientes da estabilização (oxidação bioquímica) do lodo ou polímeros provenientes do lodo gerado no processo de tratamento.

Os teores de cálcio, magnésio, zinco, ferro, manganês, cobre e boro de ambos os resíduos estão apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Teores de Ca, Mg, Zn, Fe, Mn, Cu e B, dos resíduos da indústria têxtil.

Substância	Resíduo	
	Lodo biológico	Resíduo de algodão
Ca (dag.kg <sup>-1</sup> )	3,22	1,58
Mg (dag.kg <sup>-1</sup> )	0,23	0,32
Zn (mg.kg <sup>-1</sup> )	113,5	56,0
Fe (mg.kg <sup>-1</sup> )	823,0	1636
Mn (mg.kg <sup>-1</sup> )	40,7	61,8
Cu (mg.kg <sup>-1</sup> )	1027	8,8
B (mg.kg <sup>-1</sup> )	23,2	50,2

O lodo biológico contém grande quantidade de cobre, ferro e zinco, que podem ser provenientes dos pigmentos ou corantes utilizados na indústria, os quais, por sua vez, podem ser eliminados durante as diferentes etapas de acabamento.

O resíduo de algodão apresentou altos teores de ferro, manganês e zinco, provavelmente provenientes de alguns produtos químicos, tais como pesticidas, herbicidas, fertilizantes e esfoliantes, que chegam à indústria têxtil como contaminantes do cultivo do algodão.

Para uma boa combustão, o combustível deve ter baixos teores de umidade e cinzas, elevado teor de carbono fixo e de material volátil, além de alto poder calorífico superior. Quanto maior o teor de carbono e hidrogênio, melhor será a combustão (SENA, 2005). A seguir, mostram-se os principais resultados obtidos para a caracterização dos resíduos da indústria têxtil para a produção de energia.

Na Tabela 3.5 são apresentados os valores médios da análise química imediata, poder calorífico e densidades dos resíduos da indústria têxtil.

Tabela 3.5 – Valores médios da análise química imediata, poder calorífico superior e poder calorífico útil, densidade a granel e densidade energética dos resíduos da indústria têxtil

Parâmetro	Lodo biológico	Resíduo de algodão
	Média	Média
Materiais voláteis (%)	81,0 b	90,2 a
Teor de cinzas (%)	11,8 a	8,93 b
Carbono fixo (%)	7,21 a	0,86 b
Poder calorífico superior (MJ.kg <sup>-1</sup> )	21,82 a	17,89 b
Poder calorífico inferior (MJ.kg <sup>-1</sup> )	20,35 a	16,65 b
Poder calorífico útil (MJ.kg <sup>-1</sup> )	18,48 a	14,84 b
Densidade a granel (kg.m <sup>-3</sup> )	385,67 a	37,46 b
Densidade energética (MJ.m <sup>-3</sup> )	7848,29 a	619,99 b

Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste F.

Os materiais voláteis compreendem a parte do combustível que se desprende na forma de gases, quando o material é degradado em determinadas temperaturas. Nos combustíveis de biomassa, como a madeira, a quantidade de material volátil varia entre 76% a 86%, em base seca (MORAIS *et al.*, 2005) e são responsáveis pela maior parte da geração de calor na combustão. Observa-se que o teor de materiais voláteis obtido para o resíduo de algodão foi significativamente maior em relação ao lodo biológico.

O teor de carbono fixo apresenta relação inversamente proporcional ao percentual de carbono fixo. Assim, verifica-se que o teor de carbono fixo presente no lodo foi significativamente maior que o obtido para o resíduo de algodão. Isso mostra que a velocidade de queima do lodo será mais lenta em relação ao resíduo de algodão.

O teor de cinzas é a percentagem de material inerte que não produz calor. O aumento do teor de cinzas diminui o valor do poder calorífico, pois cinzas não contribuem para o calor total liberado pela combustão. No entanto, elementos presentes nas cinzas podem agir como catalisadores na decomposição térmica (VIRMOND, 2007). Observa-se que os dois resíduos apresentaram altos teores de cinzas, tendo o lodo biológico maior percentual em relação ao resíduo de algodão, o que se deve ao maior teor de inorgânicos presentes no lodo.

O poder calorífico pode ser definido como a quantidade de calor liberada na combustão completa de uma unidade de massa de combustível, expressa em  $\text{kJ.kg}^{-1}$ . Esta propriedade é de grande importância, principalmente quando se pensa na utilização de resíduos como fonte de energia, em substituição aos combustíveis derivados do petróleo e aproveitamento energético. Observa-se que, apesar de o lodo biológico apresentar maior teor de cinzas em comparação com o resíduo de algodão, ele apresentou maior poder calorífico, provavelmente devido ao maior teor de carbono e hidrogênio presente no mesmo. Ambos os resíduos apresentaram valores de poder calorífico próximos a outros resíduos utilizados para a produção de energia, como o *Eucalyptus* sp. ( $18,95 \text{ MJ.kg}^{-1}$ ), a casca de arroz ( $15,62 \text{ MJ.kg}^{-1}$ ) e o bagaço de cana ( $15,49 \text{ MJ.kg}^{-1}$ ), conforme Quirino *et al.* (2004).

Rodrigues (2010), estudando os resíduos da indústria de celulose e papel, obteve poder calorífico superior de  $16,70 \text{ MJ.kg}^{-1}$  para o lodo biológico e  $19,38 \text{ MJ.kg}^{-1}$  para a madeira. Borges *et al.* (2008) encontraram  $20,10 \text{ MJ.kg}^{-1}$  para o lodo sanitário,  $19,50 \text{ MJ.kg}^{-1}$  para o lodo de celulose e papel e  $17,00 \text{ MJ.kg}^{-1}$  para o lodo têxtil.

Desse modo, os resultados obtidos para os resíduos da indústria têxtil podem ser considerados potenciais para a geração de energia.

### **3.3.3. Classificação das cinzas**

Os resultados encontrados para os parâmetros inorgânicos (Anexo 2), cromo e chumbo, presentes no extrato lixiviado das cinzas do lodo biológico e resíduo de algodão, respectivamente, situaram-se acima do limite estabelecido pela norma NBR 10004. Sendo assim, as cinzas foram classificadas como resíduo perigoso (Classe I).

O cromo encontrado nas cinzas do lodo biológico deve-se, provavelmente, aos corantes e pigmentos utilizados nas etapas de estamparia e tingimento. Segundo a

Associação Brasileira da Indústria Química (ABIQUIM) (2012), o pigmento verde é composto de óxido de cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) e o pigmento amarelo de cromo é constituído de cromato de chumbo e ou uma solução sólida de cromato de chumbo e sulfato de chumbo.

Por se tratarem de resíduos perigosos, as cinzas devem ser tratadas e destinadas em instalações apropriadas para tal fim. As principais técnicas de tratamento e destinação final são os aterros industriais Classe I, o coprocessamento em fornos de cimento e a estabilização/solidificação.

Os aterros industriais Classe I são aqueles projetados, instalados e operados especialmente para receber resíduos industriais classificados como perigosos (Classe I). O coprocessamento consiste em adicionarem-se resíduos químicos, combustíveis ou não, na forma de sólidos líquidos ou pastas, ao forno de cimento, durante a formação do clínquer (CUNHA, 2001). O processo estabilização/solidificação tem como objetivo solidificar e estabilizar constituintes tóxicos ou perigosos de resíduos industriais para sua posterior disposição (PRIM *et al.*, 1998).

### **3.4. Conclusões**

O lodo biológico e o resíduo de algodão da indústria têxtil foram classificados como resíduos não perigosos e não inertes (Classe II A), podendo ter propriedades, tais como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

A umidade encontrada no lodo biológico, após a secagem ao ar livre (8,2%) e no resíduo de algodão (9,0%), foi considerada satisfatória para a combustão. As amostras de lodo biológico e resíduo de algodão apresentaram alto poder calorífico. Essas características demonstram grande viabilidade de utilização dos resíduos estudados como material combustível nos processos de combustão. No entanto, o lodo biológico apresentou alto teor de nitrogênio, que pode formar gases  $\text{NO}_x$  durante a combustão.

As cinzas das amostras de lodo biológico e resíduo de algodão foram classificadas como resíduos perigosos (Classe I). Sendo assim, devem ser tratadas e destinadas a instalações apropriadas, como os aterros industriais Classe I, o coprocessamento em fornos de cimento e a estabilização/solidificação.

Além da classificação das cinzas, deve-se levar em conta a análise de emissões atmosféricas quando da combustão dos resíduos, para uma melhor análise do

reaproveitamento energético dos resíduos da indústria têxtil. Se a análise dos gases mostrarem concentrações dentro dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 436/2011 (CONAMA, 2011) e as cinzas forem tratadas e dispostas adequadamente, não haverá impedimento ao reaproveitamento energético dos resíduos da indústria têxtil, lodo biológico e resíduo de algodão, dentro da própria indústria.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Biomassa**. ATLAS. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa\(2\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa(2).pdf)>. Acesso em: 30 mai. 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: **ASTM D2015**: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by the Adiabatic Bomb Calorimeter. Philadelphia, USA, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA QUÍMICA. **Usos de corantes, pigmentos e branqueadores ópticos**. Disponível em: <[http://www.abiquim.org.br/corantes/cor\\_aplicacoes.asp](http://www.abiquim.org.br/corantes/cor_aplicacoes.asp)>. Acesso em: 11 set. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **NBR 6922**: Carvão vegetal – Ensaio físico determinação da massa específica (densidade à granel). Rio de Janeiro, 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **NBR 7993**: Determinação da umidade da madeira por secagem em estufa quando reduzida à serragem. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **NBR 8112**: Análise química imediata do carvão vegetal. Rio de Janeiro, 1986.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **NBR 10006**: Procedimento para obtenção e extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004d.

BORGES, F.; SELLIN, N.; MEDEIROS, S. H. W. Caracterização e avaliação de lodos de efluentes sanitário e industrial como biomassa na geração de energia. **Ciência & Engenharia (Science & Engineering Journal)**, v. 17, p. 27-32, 2008.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 436, de 22 de dezembro de 2011. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 26 dez. 2011.

CORRADINI, E.; TEIXEIRA, E. M.; PALADIN, P. D.; AGNELLI, J. A.; SILVA, O. R. R. F.; MATTOSO, L. H. C. Thermal stability and degradation kinetic study of white and colored cotton fibers by thermogravimetric analysis. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 97, n. 2, p. 415-419, 2009.

CUNHA, C. J. O programa de gerenciamento dos resíduos laboratoriais do depto de química da UFPR. **Química Nova**, v. 24, n. 3, p. 424-427, 2001.

FERNANDES, A. K. D. S.; SILVA, L. A. P. D.; ARAÚJO, A. L. C. Avaliação de desempenho e caracterização de resíduo sólido de uma estação de tratamento de efluente têxtil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24., 2007, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABES, 2007, p. 1-8.

LEE, E. S. H.; SANTOS, F. J. D. Caracterização do lodo proveniente de estação de tratamento de esgoto (ETE) e estudo sobre seu potencial energético. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, II., 2011, Londrina. **Anais...** Londrina: IBEAS, 2011, p. 1-9.

MORAIS, S. A. L. D.; NASCIMENTO, E. A. D.; MELO, D. C. D. Análise da madeira de Pinus oocarpa parte I – estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis. **Revista Árvore**, v. 29, n. 3, p. 461-470, jun. 2005.

PINHEIRO, G. F.; RENDEIRO, G.; PINHO, J. T. Densidade energética de resíduos florestais. **Biomassa & Energia**, v. 2, n. 2, p. 113-123, 2005.

PRIM, E. C. C.; CHERIAF, M.; CASTILHOS JR., A. B.; ROCHA, J. C.; LUZ, C. A. Valorização do lodo da indústria têxtil como material de construção civil utilizando a técnica de solidificação/estabilização com cimento. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHERIA SANITARIA Y AMBIENTAL, XXVI, 1998, Lima. **Anais...** Lima: AIDIS, 1998.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T. D.; ANDRADE, A. A. D.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. D. S. Poder calorífico da madeira e de resíduos lignocelulósicos. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 2, p. 173-182, 2004.

RAMOS, F. M. S.; KAMINATA, O. T.; BENATTI, C. T.; CAPELASSO, M.; INNOCENTI, B. D. Avaliação da técnica de solidificação/estabilização no tratamento de resíduo têxtil - produção de bloco cerâmico de vedação. **Cerâmica**, v. 55, p. 408-414, 2009.

RODRIGUES, V. A. J. **Valorização energética de lodo biológico da indústria celulósica através da briquetagem**. 2010. 134 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

ROSA, E. V. C.; MATER, L.; SOUZA-SIERRA, M. M.; RÖRIG, L. R.; VIEIRA, L. M.; RADETSKI, C. M. Textile sludge application to non-productive soil: Physico-chemical. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 68, p. 91-97, 2006.

SENA, R. F. D. **Avaliação da biomassa obtida pela otimização da flotação de efluentes da indústria de carnes para geração de energia**. 2005. 94 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

VIRMOND, E. **Aproveitamento do lodo de tratamento primário de efluentes de um frigorífico como fonte de energia**. 2007. 137 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

#### **4. CAPÍTULO 3: PRODUÇÃO DE BRIQUETES A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA INDÚSTRIA TÊXTIL PARA FINS ENERGÉTICOS**

##### **RESUMO**

AVELAR, Nayara Vilela. M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2012. **Produção de briquetes a partir de resíduos sólidos da indústria têxtil para fins energéticos.** Orientadora: Ana Augusta Passos Rezende. Coorientadores: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, Cláudio Mudado Silva e Ann Honor Mounteer.

O gerenciamento ambiental adequado dos resíduos sólidos industriais permite a sua utilização como matéria-prima para outros processos, como, por exemplo, a obtenção de energia, garantindo uma produção sustentável, além da minimização dos impactos ambientais. O processo de briquetagem apresenta-se como uma alternativa atrativa para otimizar o manuseio e transporte de resíduos sólidos, como o resíduo de algodão e o lodo biológico de estação de tratamento de efluentes, oriundos da indústria têxtil. O presente trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar o potencial de aproveitamento desses resíduos para a fabricação de briquetes. Os briquetes foram produzidos em uma briquetadeira laboratorial, com cinco proporções de lodo biológico e resíduo de algodão (0%, 25%, 50%, 75% e 100%), em três diferentes pressões (900, 1.200 e 1.500 PSI). Foram realizadas análises visuais, de variações de comprimento e perda de massa no processo de briquetagem, análise química imediata (materiais voláteis, carbono fixo e teor de cinzas), determinação do poder calorífico superior, densidade aparente, carga máxima de ruptura e umidade de equilíbrio higroscópico. O processo de briquetagem reduziu o teor de materiais voláteis e, conseqüentemente, aumentou o teor de carbono fixo e cinzas, em relação ao lodo biológico e ao resíduo de algodão. De acordo com os resultados, a pressão de compactação de 1.200 PSI mostrou-se ideal para o processo de briquetagem em escala laboratorial. A melhor proporção de mistura entre os dois resíduos foi a 25% de lodo.

Palavras-chave: lodo biológico; resíduo de algodão; aproveitamento de resíduos sólidos; briquetagem; geração de energia.

## ABSTRACT

AVELAR, Nayara Vilela. M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, October 2012. **Densification of solid waste from the textile industry for energy purposes.** Adviser: Ana Augusta Passos Rezende. Co-advisers: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, Cláudio Mudado Silva and Ann Honor Mounter.

An adequate environmental management of the industrial solid waste allows their use as raw material for other processes, such as energy generation, ensuring sustainable production and minimizing environmental impacts. The process of briquetting can be an interesting alternative to improve handling and transporting of solid waste, such as cotton residue and biological sludge from a textile mill. The purpose of this study was to evaluate the potential use of these wastes to produce briquettes. The briquettes were produced in a lab-scale briqueter, with five proportions of biological sludge and cotton residue (0, 25, 50, 75 and 100%), at three different pressures (900, 1200 and 1500 PSI). The briquettes were evaluated by visual analysis, length variations and mass loss of the briquetting process, chemical analysis (volatile matter, fixed carbon and ash content), heat value, density, compressive strength and hygroscopic moisture equilibrium. The process of briquetting reduced the content of volatile matter and, consequently, increased the content of fixed carbon and ash, in relation to biological sludge and cotton residue. According to the results, the compaction pressure of 1200 PSI showed ideal to laboratory scale briquetting process. The best mixing proportion between the two residues was 25% of sludge.

Key-words: biological sludge; cotton residue; utilization of solid waste; briquetting; energy generation.

#### 4.1. Introdução

Com o desenvolvimento tecnológico, o número de indústrias no mundo vem crescendo a cada dia e, com elas, a quantidade de resíduos industriais gerados. A maior parte desses resíduos tem destino incerto e, na maioria das vezes, ficará exposta ao ambiente, contaminando-o. Hoje, com as novas leis de proteção ao ambiente mais restritivas e a crescente e progressiva implantação de novas e exigentes diretrizes na gestão de resíduos para as sociedades industrializadas, na perspectiva de um desenvolvimento sustentável, faz-se necessário desenvolver métodos alternativos e eficazes, em substituição ao simples descarte desses em aterros industriais. Em vista disso, muitos estudos vêm sendo desenvolvidos no sentido de valorizar resíduos de diferentes naturezas, utilizando-os como matéria-prima para a produção de um material utilizável.

Uma das alternativas de reutilização desses materiais seria a produção de briquetes para geração de energia. O processo de briquetagem consiste, basicamente, na aplicação de pressão em uma massa de partículas dispersas, com objetivo de torná-las um sólido geométrico compacto de alta densidade. Por meio desse processo, os resíduos sólidos são transformados em um produto de alto valor combustível, sendo empregado na combustão para fins de geração de energia. Essa técnica, além de agregar valor econômico aos resíduos sólidos, também minimiza os impactos ambientais negativos gerados pela sua disposição inadequada, além de facilitar o manuseio e o transporte.

A densificação desses resíduos gera um produto (briquete) diretamente competitivo com a lenha e o carvão vegetal, podendo, em alguns casos, substituí-los.

No Brasil, não é prática comum utilizar o lodo biológico como biomassa para queima em caldeiras de força, no entanto, algumas indústrias têm buscado esta prática como uma das soluções para a destinação do lodo biológico que sejam ambiental e economicamente vantajosas. Os efeitos positivos e negativos da combustão do lodo para a geração de energia ainda não são bem conhecidos e, na literatura, também são poucas as informações que subsidiem a adoção desta prática.

Assim, o reaproveitamento energético de resíduos industriais, a partir da briquetagem, pode ser considerado uma alternativa ambientalmente correta de destinação, mediante a avaliação de seus possíveis impactos, principalmente de seus

subprodutos, ou dos produtos gerados, em específico as cinzas e os gases resultantes do processo de combustão.

Dessa forma, este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar o potencial de aproveitamento de resíduos da indústria têxtil, o resíduo de algodão e o lodo biológico gerado no tratamento dos efluentes industriais, para a fabricação de briquetes.

## **4.2. Material e Métodos**

### **4.2.1. Produção dos briquetes**

Foram utilizados, para a fabricação dos briquetes, dois tipos de resíduos provenientes da indústria têxtil, sendo eles o resíduo de algodão e o lodo biológico. O resíduo de algodão é proveniente da etapa de fiação e o lodo biológico, oriundo do tratamento de efluentes por lodos ativados, tendo sido coletado após a etapa de centrifugação dos mesmos.

Para o processo de briquetagem é necessário que o teor de umidade dos resíduos esteja compreendido na faixa de 8% a 15%. Assim, o lodo biológico, com umidade inicial de 90%, foi disposto em pátio para secagem ao ar livre, até atingir umidade média de 8%. O resíduo de algodão com umidade *in natura* de 9% não precisou passar pelo processo de secagem.

Para a confecção dos briquetes, primeiramente, o resíduo de algodão foi colocado em um agitador eletrostático, para a desagregação das partículas. O lodo biológico passou por moinho de facas Thomas Wiley – modelo 4 e por peneira de malha número 8 (< 4 mm), para adequação da granulometria para a produção dos briquetes.

Os briquetes foram produzidos em uma briquetadeira laboratorial com prensa pistão, marca O&C do Brasil, modelo BL 32 (Figura 4.1).

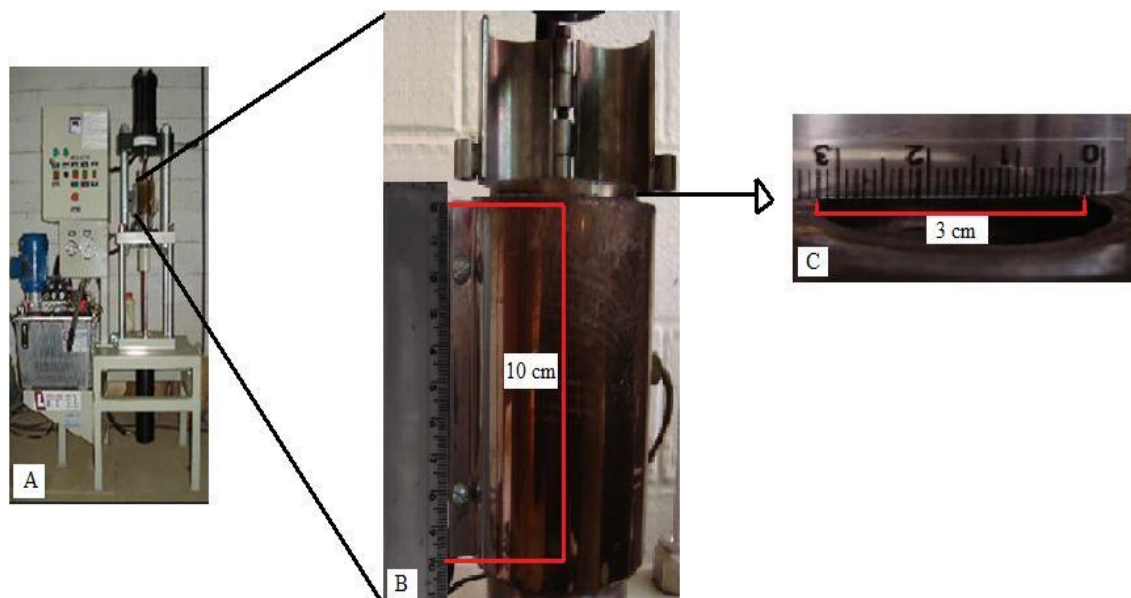


Figura 4.1 – Briquetadeira laboratorial e características da matriz da briquetadeira: (A) briquetadeira laboratorial; (B) altura da coluna cilíndrica da briquetadeira; (C) diâmetro da coluna cilíndrica da briquetadeira.

Foram utilizadas três pressões (900, 1.200 e 1.500 PSI) para a compactação dos resíduos, durante 5 minutos e tempo de resfriamento também de 5 minutos, à temperatura de 90 °C.

As proporções de lodo biológico misturado com o resíduo de algodão foram de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%, totalizando uma massa de 18 g de resíduo para cada composição de matéria-prima utilizada para a produção dos briquetes. Foram produzidos 75 briquetes, provenientes de 15 tratamentos com 5 repetições cada, conforme Figura 4.2.

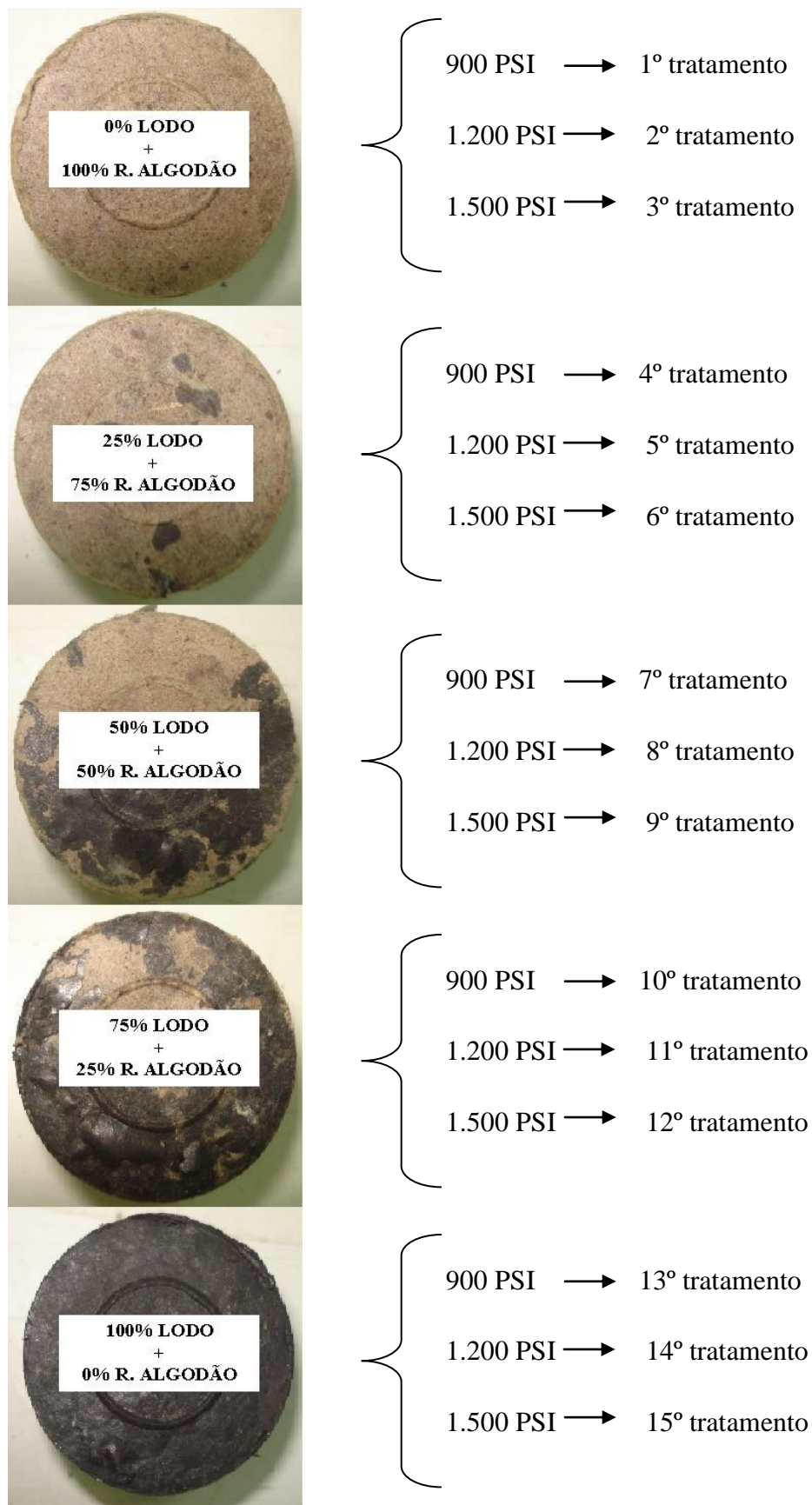


Figura 4.2 – Briquetes produzidos com a mistura dos resíduos, em cinco percentagens de lodo e resíduo de algodão e três pressões diferentes.

Após a produção, os briquetes foram avaliados por meio de análises visuais, variações de comprimento e perda de massa no processo de briquetagem. Depois, os mesmos foram acondicionados em câmara climática, à temperatura de 25 °C e umidade relativa de 65%, até atingirem massa constante.

#### 4.2.2. Propriedades dos briquetes

Para avaliar a qualidade dos briquetes, foram realizadas as seguintes análises: teor materiais voláteis, teor de cinzas e teor de carbono fixo; por meio da análise química imediata, o poder calorífico superior, a densidade aparente, a carga máxima de ruptura e a umidade de equilíbrio higroscópico.

A análise química imediata foi realizada em um termoanalisador Automatic Multiple Sample Thermogravimetric Analyzer TGA-1000. O teor de materiais voláteis foi determinado a 950±10 °C, durante 9 minutos. O teor de cinzas foi determinado à temperatura de 600±10 °C, até massa constante. O percentual de carbono fixo foi obtido por meio da seguinte expressão:

$$CF = 100 - (MV + Cz) \quad (1)$$

CF = carbono fixo (%)

MV = materiais voláteis (%)

Cz = teor de cinzas (%)

O poder calorífico superior foi determinado pelo método da bomba calorimétrica adiabática, de acordo com a norma ASTM D2015 (ASTM, 1982), baseada no princípio de Berthelot, em que a combustão se processa em ambiente fechado, na presença de oxigênio e sob pressão. No caso, o poder calorífico é computado de diferenças de temperatura coletadas antes e após a combustão dos resíduos.

A densidade aparente dos briquetes foi determinada pelo método de imersão em mercúrio (Hg), de acordo com Vital (1984).

Para a determinação da carga máxima de ruptura, utilizou-se uma máquina de teste universal modelo Losenhausen. A carga máxima de ruptura foi obtida aplicando-se uma força de compressão ao briquete, com velocidade de descida de 3,5 mm.min<sup>-1</sup>. O resultado da força máxima de ruptura foi obtido por meio de um software (Pavtest) acoplado ao equipamento. O procedimento de análise foi de acordo com a metodologia

NBR 7190 – Anexo B (ABNT, 1997), uma vez que não há normas específicas para testes em briquetes.

A umidade de equilíbrio higroscópico foi determinada após acondicionamento dos briquetes à temperatura de 23 °C e 65% de umidade relativa, em câmara climática, até atingirem massa constante.

#### **4.2.3. Delineamento experimental**

O experimento foi realizado segundo um delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 5 x 3, sendo 5 proporções de misturas entre os resíduos (0%, 25%, 50%, 75% e 100%) e 3 pressões de compactação (900, 1.200 e 1.500 PSI), com 5 repetições, totalizando 75 briquetes.

Os parâmetros analisados estatisticamente foram: taxa de retorno em comprimento, perda de massa no processo de briquetagem, materiais voláteis, teor de cinzas, carbono fixo, poder calorífico superior, densidade aparente, carga de ruptura máxima e umidade de equilíbrio higroscópico.

O efeito da proporção de lodo biológico em cada pressão foi estudado pelo teste F (Anexo 4). Quando houve efeito de interação entre a proporção de lodo e a pressão, fez-se o desdobramento de proporção dentro de pressão [PL/P] e pressão dentro de proporção [P/PL]. As médias foram comparadas pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.

#### **4.3. Resultados e Discussão**

Os briquetes produzidos não apresentaram rachaduras laterais, apenas algumas fissuras, independente da proporção de lodo utilizada e da pressão aplicada (Figura 4.3).



Figura 4.3 – Aparência visual dos briquetes produzidos

No Anexo 3 apresentam-se os valores médios das propriedades químicas, físicas e mecânicas analisadas nos briquetes.

A taxa de retorno em comprimento dos briquetes, após o processo de compactação, afeta o armazenamento e o transporte. Além disso, a variação das dimensões interfere diretamente no planejamento de utilização dos briquetes, pois essa variável tem relação direta com a resistência (VILAS BOAS, 2011).

Na Tabela 4.1 são apresentados os valores médios de taxa de retorno em comprimento dos briquetes em função da e da pressão de compactação.

Tabela 4.1 – Valores médios da taxa de retorno em comprimento (%) dos briquetes, em função da proporção de lodo na composição e da pressão de compactação

Proporção de lodo (%)	Pressão (PSI)			Média geral
	900	1200	1500	
0	2,88 Aa	2,15 Ab	1,79 Ac	2,27
25	1,63 Ba	1,61 Ba	1,58 Bb	1,61
50	1,41 Cb	1,45 Ca	1,36 Cc	1,41
75	1,22 Da	1,20 Da	0,94 Db	1,12
100	0,85 Eb	0,85 Eb	0,90 Ea	0,86
Média Geral	1,60	1,45	1,31	

Letras maiúsculas na linha comparam as pressões dentro de cada proporção de lodo e letras minúsculas na coluna comparam as proporções de lodo dentro de cada pressão, a 95% de probabilidade, pelo teste Tukey.

De modo geral, para uma mesma proporção de lodo, a taxa de retorno em comprimento dos briquetes não foi afetada pela pressão de compactação.

Analisando-se o efeito isolado da proporção de lodo, para uma mesma pressão, observa-se que os briquetes produzidos com maiores percentagens de lodo na mistura apresentaram as menores variações no comprimento.

Os fatores que podem ter contribuído para a variação do comprimento nos briquetes são a umidade de equilíbrio higroscópico das partículas, o tamanho das partículas e a composição química das matérias-primas utilizadas.

Na Tabela 4.2 apresentam-se os valores médios de perda de massa dos briquetes, em função da proporção de lodo utilizada e da pressão de compactação.

Tabela 4.2 – Valores médios da perda de massa (%) dos briquetes, em função da proporção de lodo na composição e da pressão de compactação.

Proporção de lodo (%)	Pressão (PSI)			Média Geral
	900	1200	1500	
0	6,00	6,00	6,20	6,07 A
25	6,00	6,40	6,00	6,13 A
50	5,80	6,00	4,80	5,53 A
75	5,20	4,60	4,20	4,67 B
100	4,00	4,20	4,40	4,20 B
Média Geral	5,40 a	5,44 a	5,12 a	

Letras iguais indicam valores significativamente iguais, no teste Tukey, a 95% de probabilidade.

De modo geral, a pressão de compactação e proporção de lodo não afetou de forma significativa a perda de massa dos briquetes.

Apesar de não ser significativa, verificou-se uma redução na perda de massa dos briquetes com o aumento da proporção de lodo nos mesmos. Foi observada, durante o processo de briquetagem, maior perda para aqueles que continham mais resíduo de algodão na sua composição.

A perda de massa dos briquetes ocorreu devido à evaporação de água e à perda de material durante o processo de compactação.

Nas Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 são apresentados os valores médios de materiais voláteis, teor de cinzas e carbono fixo, respectivamente, em função dos tratamentos. De acordo com a análise de variância, não houve efeito da interação, da pressão de compactação e da proporção de lodo, para as variáveis teor de materiais voláteis e carbono fixo.

Tabela 4.3 – Valores médios de materiais voláteis (%) dos briquetes, em função da proporção de lodo na composição e da pressão de compactação.

Proporção de lodo (%)	Pressão (PSI)			Média geral
	900	1200	1500	
0	76,38	77,09	77,21	76,89 C
25	77,35	77,83	77,23	77,47 BC
50	77,35	77,92	78,06	77,78 B
75	78,61	77,98	79,07	78,55 A
100	77,64	77,89	78,39	77,97 AB
Média Geral	77,47 b	77,74 ab	77,99 a	

Letras iguais indicam valores significativamente iguais, no teste Tukey, a 95% de probabilidade.

Tabela 4.4 – Valores médios de carbono fixo (%) dos briquetes, em função da proporção de lodo na composição e da pressão de compactação.

Proporção (%)	Pressão (PSI)			Média geral
	900	1200	1500	
0	11,26	11,30	10,34	10,96 A
25	10,15	9,43	10,04	9,87 B
50	10,09	9,73	9,44	9,75 B
75	8,53	8,72	7,81	8,35 C
100	8,86	8,68	8,59	8,71 C
Média Geral	9,77 a	9,57 ab	9,24 b	

Letras iguais indicam valores significativamente iguais, no teste Tukey, a 95% de probabilidade.

Tabela 4.5 – Valores médios do teor de cinzas (%) dos briquetes, em função da proporção de lodo na composição e da pressão de compactação

Proporção (%)	Pressão (PSI)			Média geral
	900	1200	1500	
0	12,37 Da	11,62 Db	12,45 Ca	12,15
25	12,51 Cb	12,76 Ba	12,73 Ba	12,67
50	12,57 Ca	12,36 Cb	12,50 Ca	12,48
75	12,87 Bc	13,31 Aa	13,12 Ab	13,10
100	13,50 Aa	13,44 Aa	13,02 Ab	13,32
Média Geral	12,76	12,70	12,76	

Letras maiúsculas na linha comparam as pressões dentro de cada proporção de lodo e letras minúsculas na coluna comparam as proporções de lodo dentro de cada pressão a 95% de probabilidade pelo teste Tukey.

Observa-se que o processo de compactação reduziu o teor de materiais voláteis, provavelmente, devido à temperatura utilizada para a produção dos briquetes, que podem ter ocasionado degradação térmica ou volatilização de alguns constituintes químicos das matérias-primas utilizadas. Os percentuais de materiais voláteis, nas matérias-primas empregadas para a produção dos briquetes, foram de 81% e 90%, para o lodo biológico e o resíduo de algodão, respectivamente, e nos briquetes esses valores foram reduzidos para 76% e 79%, respectivamente. Conseqüentemente, como a variável carbono fixo é inversamente proporcional ao teor de materiais voláteis, logo se teve um incremento desta variável e também do teor de cinzas.

Avaliando-se o efeito das diferentes proporções do lodo em função da pressão de compactação, observa-se que os briquetes produzidos com maiores percentagens de resíduo de algodão apresentaram o maior percentual de carbono fixo, em relação aos demais, sendo também os briquetes com menores teores de materiais voláteis.

Observou-se também que os briquetes produzidos a 1.500 PSI foram os que apresentaram maiores teores de materiais voláteis e, conseqüentemente, menores percentagens de carbono fixo.

Avaliando-se o efeito das diferentes proporções do lodo no teor de cinza dos briquetes em função da pressão de compactação (Tabela 4.5), verifica-se que aqueles produzidos somente com o resíduo de algodão apresentaram os menores teores de cinzas, independente da pressão de compactação utilizada. Este resultado já era esperado, visto que esse resíduo apresentou baixo teor de cinzas, em comparação com o lodo biológico.

Filippeto (2008), analisando briquetes produzidos com casca de arroz, observou que a briquetagem reduziu o percentual de materiais voláteis em 3% e, conseqüentemente, aumentou o carbono fixo em 6% e o teor de cinzas em 7%.

Na Tabela 4.6 são apresentados os valores médios de poder calorífico superior dos briquetes, em função da interação entre a proporção de lodo e a pressão de compactação.

Tabela 4.6 – Valores médios de poder calorífico superior ( $\text{MJ.kg}^{-1}$ ) dos briquetes, em função da proporção de lodo na composição e da pressão de compactação

Proporção (%)	Pressão (PSI)			Média geral
	900	1200	1500	
0	17,85 Db	18,44 Ba	18,02 Db	18,10
25	18,15 Da	18,05 BCa	17,95 Da	18,05
50	18,67 Ca	17,83 Cb	18,79 Ca	18,43
75	20,55 Bb	20,85 Aab	20,93 Ba	20,78
100	21,34 Aa	21,23 Aa	21,40 Aa	21,32
Média geral	19,31	19,28	19,41	

Letras maiúsculas na linha comparam as pressões dentro de cada proporção de lodo e letras minúsculas na coluna comparam as proporções de lodo dentro de cada pressão, a 95% de probabilidade, pelo teste Tukey.

Observou-se que houve um incremento do poder calorífico superior dos briquetes com o aumento de lodo biológico na composição. Já era esperado um maior poder calorífico nos briquetes produzidos com maiores percentagens de lodo na mistura, pois esse resíduo apresentou elevado PCS ( $21,82 \text{ MJ.kg}^{-1}$ ) em relação ao resíduo de algodão ( $17,89 \text{ MJ.kg}^{-1}$ ).

Os valores de poder calorífico superior dos briquetes são compatíveis com os resultados encontrados em briquetes produzidos com outros tipos de resíduos. Rodrigues (2010) encontrou valores médios de 15 a  $19 \text{ MJ.kg}^{-1}$ , para briquetes produzidos com mistura de finos de madeira e lodo biológico da indústria de celulose e

papel. Gentil (2008) obteve um PCS de, aproximadamente, 18 MJ.kg<sup>-1</sup>, para briquetes produzidos com madeira e casca de algodão.

Na Tabela 4.7 apresentam-se os valores médios de densidade aparente dos briquetes, em função da proporção de lodo e das pressões de compactação. De acordo com a análise de variância, não houve efeito significativo da interação.

Tabela 4.7 – Valores médios de densidade aparente (g.cm<sup>-3</sup>) dos briquetes, em função da pressão de compactação e da proporção de lodo na composição.

Proporção (%)	Pressão (PSI)			Média geral
	900	1200	1500	
0	1,18	1,18	1,18	1,18 D
25	1,18	1,19	1,19	1,19 D
50	1,20	1,20	1,20	1,20 C
75	1,23	1,23	1,22	1,22 B
100	1,27	1,27	1,27	1,27 A
Média geral	1,21 a	1,21 a	1,21 a	

Letras iguais indicam valores significativamente iguais, no teste Tukey, a 95% de probabilidade.

A densidade expressa a quantidade de material por unidade de volume, portanto, quanto maior, mais concentrada está a energia e, assim, tem-se um briquete com maior potencial energético em um mesmo volume (FURTADO *et al.*, 2010).

Observa-se que a densidade aparente aumentou com a adição do lodo na composição da mistura dos briquetes. Isso se deve à alta densidade do lodo biológico. De modo geral, a pressão de compactação não afeta significativamente a densidade aparente dos briquetes.

A densidade aparente encontrada neste trabalho variou de 1,18 a 1,27, sendo esses valores próximos aos produzidos com diferentes tipos de material, como os produzidos com aparas de madeira (1,16 g.cm<sup>-3</sup>), casca de arroz (1,28 g.cm<sup>-3</sup>) e bagaço de cana (1,10 g.cm<sup>-3</sup>), conforme Quirino (2002).

Rodrigues (2010) relatou valores entre 1,10 e 1,50 g.cm<sup>-3</sup> para briquetes produzidos com diferentes misturas de lodo de celulose e papel e finos de madeira e Gentil (2008) encontrou 1,06 g.cm<sup>-3</sup>, para briquetes produzidos com serragem e casca de algodão.

A carga máxima de ruptura é um parâmetro importante na avaliação do briquete quanto ao manuseio e ao empilhamento, dentre outras.

Na Tabela 4.8 são apresentados os valores médios de carga máxima de ruptura dos briquetes, em função da proporção de lodo e da pressão de compactação. De acordo com a análise de variância, não houve efeito significativo da interação.

Tabela 4.8 – Valores médios de carga máxima de ruptura (kgf) dos briquetes, em função da proporção de lodo na composição e da pressão de compactação.

Proporção (%)	Pressão (PSI)			Média Geral
	900	1200	1500	
0	259,40	258,20	245,80	254,47 A
25	196,40	186,20	191,20	191,27 B
50	148,40	146,40	143,00	145,93 C
75	110,00	90,40	94,80	98,40 D
100	96,20	85,80	97,00	93,00 D
Média Geral	162,08 a	153,40 b	154,36 b	

Letras iguais indicam valores significativamente iguais, no teste Tukey a 95% de probabilidade.

Verifica-se que à medida que aumentou o percentual de lodo na composição dos briquetes, a resistência dos mesmos foi reduzida. Isso pode ser explicado pelo fato de o lodo biológico ser um material de composição mais heterogênea e menos lignificada que o resíduo de algodão e, portanto, com maior dificuldade de aglutinação das partículas, o que resulta na menor resistência dos briquetes.

Durante o ensaio de compressão foi observado que os briquetes produzidos com maior percentual de lodo fragmentaram, enquanto os produzidos com maior percentual de resíduo de algodão permaneceram com sua estrutura inicial mais intacta.

Analisando-se o efeito isolado da pressão de compactação, verificou-se, para os briquetes produzidos a 900 PSI, o maior valor médio da carga de ruptura, diferindo estatisticamente dos demais.

Vilas Boas (2011), estudando briquetes de diferentes madeiras, encontrou valores médios de carga máxima de ruptura variando entre 114 e 139 kfg.

A estabilidade dimensional dos briquetes, de modo geral, está diretamente relacionada à higroscopicidade da matéria-prima utilizada, além da pressão e da temperatura exercida no processo de briquetagem (RODRIGUES, 2010).

O conhecimento da umidade de equilíbrio higroscópico dos briquetes é de grande importância, pois o baixo percentual de umidade favorece o transporte, ou seja, diminui os custos visto que a quantidade de energia por volume transportado é muito maior. Além disso, a baixa umidade de equilíbrio higroscópico confere aos briquetes

seu formato compactado e, conseqüentemente, maior resistência física e mecânica (VILAS BOAS, 2011).

Na Tabela 4.9 observam-se os valores médios de umidade de equilíbrio higroscópico dos briquetes, em função da proporção de lodo utilizada e da pressão de compactação.

Tabela 4.9 – Valores médios de umidade de equilíbrio higroscópico (%) dos briquetes, em função da proporção de lodo na composição e da pressão de compactação

Proporção (%)	Pressão (PSI)			Média geral
	900	1200	1500	
0	10,95 Aa	10,43 Ba	10,99 Aa	10,79
25	11,04 Aa	10,59 Ba	10,88 Aa	10,84
50	10,86 Ab	11,82 Aa	10,90 Ab	11,19
75	10,46 Aa	10,49 Ba	10,31 Aa	10,42
100	10,70 Aa	10,47 Ba	10,53 Aa	10,57
Média geral	10,80	10,76	10,72	

Letras maiúsculas na linha comparam as pressões dentro de cada proporção de lodo e letras minúsculas na coluna comparam as proporções de lodo dentro de cada pressão, a 95% de probabilidade, pelo teste Tukey.

Observou-se que, de modo geral, a umidade de equilíbrio higroscópico dos briquetes não foi afetada pela proporção de lodo utilizada, exceto para os briquetes produzidos com 50% de lodo biológico.

Analisando-se o efeito da pressão de compactação, observa-se que os briquetes produzidos com 50% de lodo a 900 e 1.500 PSI foram os únicos que diferiram estatisticamente dos demais.

Para se estudar a viabilidade de estocagem e transporte dos briquetes devem ser analisados os seguintes parâmetros: densidade aparente, resistência à compressão e higroscopicidade. Logo, materiais com densidades maiores facilitam o armazenamento. Já a resistência à compressão e a higroscopicidade dos briquetes são importantes para avaliar a estrutura física destes materiais em relação aos impactos sofridos durante o armazenamento e o transporte (RODRIGUES, 2010).

#### 4.4. Conclusões

O processo de briquetagem reduziu o teor de materiais voláteis e, conseqüentemente, houve um aumento percentual no teor de carbono fixo e cinzas, em relação aos resíduos, ao lodo biológico e ao resíduo de algodão.

A pressão de compactação de 1.200 PSI mostrou-se ideal para o processo de briquetagem em escala laboratorial, pois, nessa pressão, se obteve o menor teor de cinzas e foi estatisticamente igual às pressões com maiores percentagens de materiais voláteis e carbono fixo. Para os parâmetros poder calorífico superior, densidade aparente e umidade de equilíbrio higroscópico, a pressão não apresentou efeito significativo.

O lodo biológico melhorou as características dos briquetes em relação aos materiais voláteis, poder calorífico superior, densidade aparente e umidade de equilíbrio higroscópico. A adição do resíduo de algodão diminuiu o percentual de cinzas e aumentou o teor de carbono fixo e carga máxima de ruptura. A melhor proporção de mistura entre os dois resíduos foi a 25% de lodo, pois, com essa porcentagem, conseguem-se briquetes com alto teor de materiais voláteis, carbono fixo, poder calorífico superior, densidade aparente e carga máxima de ruptura, baixo teor de cinzas e umidade de equilíbrio higroscópico.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: **ASTM D2015**: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by the Adiabatic Bomb Calorimeter. Philadelphia, USA, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **NBR 7190 – Anexo B**: Métodos de ensaio para determinação das propriedades da madeira para projetos de estrutura – resistência à compressão. Rio de Janeiro , 1997.

FILIPPETTO, D. **Briquetagem de resíduos vegetais**: viabilidade técnico-econômica e potencial de mercado. 2008. 61 p. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2008.

FURTADO, T. S.; VALIN, M.; BRAND, M. A.; BELLOTE, A. F. J. Variáveis do processo de briquetagem e qualidade de briquetes de biomassa florestal. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 30, n. 62, p. 101-106, 2010.

GENTIL, L. V. B. **Tecnologia e economia do briquete de madeira**. 2008. 196 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Brasília, 2008.

QUIRINO, W. F. **Utilização energética de resíduos vegetais**. Brasília: Laboratório de Produtos Florestais, IBAMA, 2002. 31 p.

RODRIGUES, V. A. J. **Valorização energética de lodo biológico da indústria celulósica através da briquetagem**. 2010. 134 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

VILAS BOAS, M. A. **Efeito do tratamento térmico da madeira para produção de briquetes**. 2011. 65 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Viçosa: SIF, 1984. 21 p. (Boletim técnico, 1)

## 5. CONCLUSÕES GERAIS

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, cujo objetivo foi avaliar a viabilidade técnica e ambiental do uso do resíduo de algodão e do lodo biológico proveniente do tratamento de efluentes de uma indústria têxtil para a produção de briquetes, foi possível concluir que:

- a classificação (resíduos Classe IIA – não perigosos e não inertes), as características físicas e químicas e o comportamento térmico demonstraram que os resíduos estudados, lodo biológico e resíduo de algodão, podem ser utilizados na produção de briquetes;
- as cinzas do lodo biológico e resíduo de algodão foram classificadas como resíduos perigosos (Classe I), devendo ser tratadas e dispostas adequadamente, após a combustão;
- o processo de briquetagem reduziu o teor de materiais voláteis e elevou o teor de cinzas e carbono fixo dos briquetes. O poder calorífico superior se manteve praticamente igual aos resíduos antes de serem densificados;
- a pressão de compactação ideal para o processo em escala laboratorial foi a de 1.200 PSI. Em relação às diferentes misturas de lodo biológico e resíduo de algodão utilizadas durante a briquetagem, verificou-se que o lodo biológico melhorou as características dos briquetes em relação aos materiais voláteis, poder calorífico superior, densidade aparente e umidade de equilíbrio higroscópico, e a adição do resíduo de algodão diminuiu o percentual de cinzas e aumentou o teor de carbono fixo e carga máxima de ruptura. A melhor proporção de mistura entre os dois resíduos foi a 25% de lodo;
- as análises de emissões atmosféricas são necessárias para se obter uma melhor análise da viabilidade ambiental do reaproveitamento energético dos resíduos, tendo essas análises mostrado concentrações dentro dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 436/2011 (CONAMA, 2011), não haverá impedimento ao reaproveitamento energético do lodo biológico e do resíduo de algodão.

Neste trabalho foi demonstrado que tanto o lodo biológico quanto o resíduo de algodão podem ser utilizados como material combustível nos processos de combustão. No entanto, ressalta-se que devem ser utilizados dentro da própria indústria, para ter controle das cinzas. O estudo possibilitou uma alternativa de reaproveitamento dos

resíduos, visto que estes não são reutilizados na indústria. A fabricação de briquetes com lodo e resíduo de algodão e o seu uso como combustível representam uma forma ambientalmente adequada de reaproveitamento destes resíduos nas indústrias, aumentando seu ciclo de vida e agregando valor econômico aos resíduos.

Sugere-se que, em trabalhos futuros, sejam feitos um estudo dos poluentes atmosféricos emitidos quando da combustão dos resíduos e um estudo de viabilidade econômica da implantação do sistema composto de briquetadeira e caldeira de biomassa na indústria.

## ANEXO 1 – ENSAIOS DE LIXIVIAÇÃO E SOLUBILIZAÇÃO DOS RESÍDUOS

Tabela 1 – Características do extrato lixiviado dos resíduos, lodo biológico e resíduo de algodão

Parâmetros	Unidade	Lixiviado Lodo biológico	Lixiviado Resíduo de algodão	VMP (*)
Arsênio	mg.L <sup>-1</sup>	0,03	<0,01	1,0
Bário	mg.L <sup>-1</sup>	<0,005	0,10	70,0
Cádmio	mg.L <sup>-1</sup>	<0,001	0,02	0,5
Chumbo	mg.L <sup>-1</sup>	<0,01	<0,01	1,0
Cromo total	mg.L <sup>-1</sup>	0,47	0,14	5,0
Fluoretos	mg.L <sup>-1</sup>	0,29	<0,10	150,0
Mercúrio	mg.L <sup>-1</sup>	<0,0002	<0,0002	0,1
Prata	mg.L <sup>-1</sup>	<0,01	<0,01	5,0
Selênio	mg.L <sup>-1</sup>	<0,01	<0,01	1,0

(\*) VMP = valor máximo permissível

Tabela 2 – Características do extrato solubilizado dos resíduos, lodo biológico e resíduo de algodão

Parâmetros	Unidade	Solubilizado Lodo biológico	Solubilizado Resíduo de algodão	VMP (*)
Alumínio	mg.L <sup>-1</sup>	<0,01	<b>3,68</b>	0,2
Arsênio	mg.L <sup>-1</sup>	<0,01	<0,01	0,01
Bário	mg.L <sup>-1</sup>	<b>0,11</b>	<0,005	0,7
Cádmio	mg.L <sup>-1</sup>	0,003	<0,01	0,005
Chumbo	mg.L <sup>-1</sup>	<b>0,04</b>	<0,01	0,01
Cianeto	mg.L <sup>-1</sup>	<0,01	0,06	0,07
Cloreto	mg.L <sup>-1</sup>	<b>320</b>	235	250,0
Cobre	mg.L <sup>-1</sup>	<0,01	0,38	2,0
Cromo total	mg.L <sup>-1</sup>	<b>0,38</b>	<b>0,20</b>	0,05
Fenóis	mg.L <sup>-1</sup>	<b>2,08</b>	<0,001	0,01
Ferro	mg.L <sup>-1</sup>	<b>0,65</b>	<b>20,8</b>	0,3
Fluoretos	mg.L <sup>-1</sup>	<b>1,60</b>	0,46	1,5
Manganês	mg.L <sup>-1</sup>	<0,1	<b>0,68</b>	0,1
Mercúrio	mg.L <sup>-1</sup>	<0,0002	<0,0002	0,001
Nitrato	mg.L <sup>-1</sup>	<b>31,0</b>	0,62	10,0
Prata	mg.L <sup>-1</sup>	<0,01	<0,01	0,05
Selênio	mg.L <sup>-1</sup>	<0,01	<0,01	0,01
Sulfatos	mg.L <sup>-1</sup>	80	<b>627,3</b>	250,0
Zinco	mg.L <sup>-1</sup>	0,03	<b>5,56</b>	5,0

(\*) VMP = valor máximo permissível

## ANEXO 2 – ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO DAS CINZAS

Tabela 1 – Características do extrato lixiviado das cinzas dos resíduos

Parâmetros	Unidade	Lixiviado Lodo biológico	Lixiviado Resíduo de algodão	VMP (*)
Arsênio	mg.L <sup>-1</sup>	ND	ND	1,0
Bário	mg.L <sup>-1</sup>	3,662	8,124	70,0
Cádmio	mg.L <sup>-1</sup>	0,010	0,014	0,5
Chumbo	mg.L <sup>-1</sup>	0,892	<b>1,085</b>	1,0
Cromo total	mg.L <sup>-1</sup>	<b>327,70</b>	3,864	5,0
Fluoretos	mg.L <sup>-1</sup>	-	-	150,0
Mercúrio	mg.L <sup>-1</sup>	-	-	0,1
Prata	mg.L <sup>-1</sup>	ND	ND	5,0
Selênio	mg.L <sup>-1</sup>	0,108	0,103	1,0

VMP = valor máximo permissível (NBR 10004/2004a)

ND = não detectado

Tabela 2 – Dados obtidos no procedimento de lixiviação e a classificação das cinzas (NBR 10004)

Parâmetros	Lodo biológico	Resíduo de algodão
pH extrato lixiviado	10,72	11,35
Tempo de lixiviação (horas)	18	18
Volume dos líquidos (mL)	1.000	1.000
Classificação do resíduo	Classe I	Classe I

### ANEXO 3 – PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E QUÍMICAS DOS BRIQUETES

Tabela 1 – Valores médios dos resultados das propriedades físicas, mecânicas e químicas dos briquetes

Tratamento	Proporção de lodo (%)	Pressão (PSI)	Taxa de retorno em comprimento (%)	Perda de massa (%)	Densidade aparente (g.cm <sup>-3</sup> )	Carga de ruptura máxima (kgf)	Umidade de equilíbrio higroscópico (%)	Materiais voláteis (%)	Teor de cinzas (%)	Carbono fixo (%)	Poder calorífico superior (MJ.kg <sup>-1</sup> )
T1	0	900	2,88	6	1,18	259	10,95	76,38	12,37	11,25	17,85
T2	0	1200	2,15	6	1,18	258	10,43	77,04	11,62	11,30	18,44
T3	0	1500	1,79	6,2	1,18	246	10,99	77,21	12,45	10,34	18,02
T4	25	900	1,63	6	1,18	196	11,04	77,35	12,51	10,14	18,15
T5	25	1200	1,61	6,4	1,19	186	10,59	77,82	12,75	9,42	18,05
T6	25	1500	1,58	6	1,19	191	10,88	77,23	12,73	10,04	17,95
T7	50	900	1,41	5,8	1,20	148	10,86	77,35	12,57	10,09	18,67
T8	50	1200	1,45	6	1,20	146	11,82	77,91	12,36	9,73	17,83
T9	50	1500	1,36	4,8	1,20	143	10,90	78,06	12,50	9,44	18,79
T10	75	900	1,22	5,2	1,23	110	10,46	78,61	12,86	8,53	20,55
T11	75	1200	1,20	4,6	1,23	90	10,49	77,97	13,31	8,72	20,85
T12	75	1500	0,94	4,2	1,22	95	10,31	79,07	13,12	7,81	20,93
T13	100	900	0,85	4	1,27	96	10,70	77,64	13,50	8,86	21,34
T14	100	1200	0,85	4,2	1,27	86	10,47	77,88	13,44	8,68	21,23
T15	100	1500	0,90	4,4	1,27	97	10,53	78,39	13,02	8,59	21,40

ANEXO 4 – RESUMO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (TESTE F)

Tabela 1 – Análise de variância dos parâmetros taxa de retorno em comprimento, perda de massa, densidade aparente, carga de ruptura máxima e umidade de equilíbrio higroscópico, em função da proporção de lodo e da pressão

FV	Quadrados médios					
	GL	Taxa de retorno em comprimento	Perda de massa	Densidade aparente	Carga de ruptura máxima	Umidade de equilíbrio higroscópico
Proporção de lodo	4	4,3335*	11,0467*	0,021281*	68721*	1,30079*
Pressão	2	0,5041*	0,7600 <sup>ns</sup>	0,000025 <sup>ns</sup>	566*	0,04044 <sup>ns</sup>
Proporção x Pressão	8	0,299*	0,7767 <sup>ns</sup>	0,000065 <sup>ns</sup>	152 <sup>ns</sup>	0,57457*
Resíduo	60	0,0003	0,4067	0,000087	93	0,24997
CV (%)		1,26	11,99	0,77	6,14	4,65

FV = fator de variância; GL = grau de liberdade; CV = coeficiente de variação

\* = significativo; <sup>ns</sup> = não significativo;  $\alpha = 5\%$

Tabela 2 – Análise de variância dos parâmetros materiais voláteis, teor de cinzas, carbono fixo e poder calorífico superior, em função da proporção de lodo e da pressão

FV	Quadrados médios				
	GL	Materiais voláteis	Teor de cinzas	Carbono fixo	Poder calorífico superior
Proporção de lodo	4	2,26023*	1,33148*	6,4118*	15,0359*
Pressão	2	0,6919*	0,01519*	0,7171*	0,0490 <sup>ns</sup>
Proporção x Pressão	8	0,2713 <sup>ns</sup>	0,17363*	0,2203 <sup>ns</sup>	0,1988*
Resíduo	15	0,11844	0,00195	0,1128	0,0211
CV (%)		0,44	0,35	3,52	0,75

FV = fator de variância; GL = grau de liberdade; CV = coeficiente de variação

\* = significativo; <sup>ns</sup> = não significativo;  $\alpha = 5\%$