

III-149 ANÁLISE DO RESÍDUO SÓLIDO GERADO NO TRATAMENTO DE EFLUENTE DE LAVANDERIA INDUSTRIAL VISANDO REAPROVEITAMENTO

Mariana Alves Pereira Zóia ⁽¹⁾

Graduanda em Biotecnologia pelo Instituto de Genética e Bioquímica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), bolsista de Iniciação Científica financiada pela Fundação de Amparo a Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) no Instituto de Química/UFU e membro sócio da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária participante da Câmara Temática de Resíduos Sólidos da mesma.

Talita Ferreira Rezende Costa

Mestranda do Programa de Pós Graduação em Química/ UFU

José Pedro Thompson Júnior

Mestrando do Programa de Pós Graduação em Química/ UFU

Sheila Cristina Canobre

Professora Doutora do Instituto de Química/ UFU

Fábio Augusto do Amaral

Professor Doutor do Instituto de Química/ UFU

Endereço⁽¹⁾: Avenida João XXIII, 703, Santa Maria, Uberlândia – Minas Gerais - CEP: 308408-056 – Brasil – Telefone (34) 9652 2844 – email: marianazoia@hotmail.com

RESUMO

A compatibilização industrial de processos produtivos com a conservação do meio ambiente é o ponto crucial para o desenvolvimento sustentável, o qual está se tornando obrigatoriedade legal no Brasil com a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Em vista disso, essa pesquisa teve por foco a adequação das indústrias a uma nova gestão de resíduos sólidos, e para isso tomou como base um tipo de indústria o qual demanda uma notável quantia de água no meio urbano, conseqüentemente produzindo quantidades consideráveis de lodo: a Lavanderia Industrial. Assim, o tratamento do efluente foi realizado por três metodologias distintas e alternativas à convencional utilizada, a qual é baseada em quatro etapas: Equalização (NaOH), Coagulação ($Al_2(SO_4)_3$), Alcalinização ($Ca(OH)_2$) e Floculação (Polieletrólito Aniônico). O objetivo deste estudo foi o desenvolvimento de metodologias alternativas para diminuição da quantidade de resíduo sólido gerado e substituição do coagulante inorgânico pelo orgânico e biodegradável, Tanino, a fim de gerar um resíduo sólido com maior potencial de reaproveitamento. Após o tratamento físico-químico, o resíduo sólido gerado foi caracterizado de acordo com a porcentagem de Resíduos Fixos e Voláteis, Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier, Difractometria de Raios X e caracterização térmica por Termogravimetria e Análise Térmica Diferencial. Os resultados mostraram que o tratamento convencional realizado na Lavanderia Industrial é eficaz e cria condições de despejo a corpos hídricos sem alteração de sua qualidade, porém não é eficiente em parâmetros fundamentais como DQO e DBO, além de produzir um resíduo sólido predominantemente inorgânico. A proposta alternativa de tratamento de efluente que contou com a utilização associada de Tanino e $Al_2(SO_4)_3$ na proporção 1:1 foi a mais eficiente para remoção do índice de turbidez (98,51%) e obtenção de menor volume de lodo formado (380 mL) por litro de efluente tratado. Além disso, foi comprovado por essa metodologia ser viável a associação dos coagulantes orgânico e inorgânico. O tratamento que contou somente com a aplicação do coagulante orgânico produziu um resíduo sólido com maior percentual de material volátil e biodegradável. Assim, conclui-se que é possível viabilizar o reaproveitamento do lodo gerado e agregar valor a ele para fins energéticos ou em uso agrícola, porém é necessário ser feito um tratamento no qual seja aumentada a porcentagem de resíduos voláteis visto que as características intrínsecas desse tipo de efluente já fazem do seu lodo um resíduo majoritariamente inorgânico.

PALAVRAS-CHAVE: Lei 12.305/2010, Tratamento de Efluentes, Lavanderia Industrial, Tanino, Reaproveitamento de Resíduos.

INTRODUÇÃO

Em 1972 ocorreu na Suécia a Conferência de Estocolmo sobre o ambiente urbano, a qual foi consequência de discussões crescentes sobre o risco de degradação do meio ambiente, iniciadas décadas antes devido à crescente globalização pós Revolução Industrial. Foi nesse evento que se utilizou pela primeira vez uma nova expressão designada ecodesenvolvimento ou desenvolvimento sustentável, a qual significa que o desenvolvimento deve proporcionar a satisfação das necessidades básicas das populações em solidariedade com as gerações futuras, de forma a não privá-las dos recursos naturais. Eventos como Estocolmo, Conferência Mundial do Meio Ambiente (Rio de Janeiro, 1992) e a futura Conferência Rio+20 (Rio de Janeiro, 2012) ocorreram e ocorrerão, pois acredita-se que a lógica do desenvolvimento da economia não deve entrar em conflito com a evolução da biosfera como proposto pelo físico Henry Kendall (Prêmio Nobel de Física), que em 1994 afirmou que ‘os seres humanos e o mundo natural estão numa rota de colisão’¹.

Atualmente, o desenvolvimento sustentável pode ser considerado o assunto do século e um fator crucial para a sustentabilidade é o entendimento de que a proteção do meio ambiente é parte integrante do processo de desenvolvimento da sociedade. Em nível industrial, o ponto fundamental para viabilizar o ecodesenvolvimento é compatibilizar os processos produtivos com a conservação do meio ambiente que os cerca, realizando-se, por exemplo, uma gestão adequada de resíduos industriais a qual inclui o despejo de efluentes de maneira adequada e compatível com as normas legais exigidas no local de descarte além do reaproveitamento de efluentes líquidos e sólidos.

O processo sustentável de gestão de resíduos industriais líquidos e sólidos é essencial e deve ser estudado a fim de remediar a poluição causada pelo descarte dessas águas na natureza. De um lado, há diversos mecanismos, reagentes e pesquisa de métodos eficazes (eficiência na despoluição e viabilidade econômica) para o tratamento de efluentes líquidos; de outro lado há a pesquisa para aproveitamento do lodo gerado neste processo. Tais ramos são muito promissores, visto que reaproveitamento das águas e do resíduo sólido produzido nos tanques das estações de tratamento de água vem sendo uma das principais preocupações das companhias de saneamento de todo o Brasil². A Legislação Brasileira atuou no reconhecimento da importância da gestão adequada e sustentável de resíduos sólidos com a instituição, em 12 de agosto de 2010, da Lei 12.305/2010: Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Assim, o setor industrial deve adotar práticas de sustentabilidade não apenas intencionais ou publicitárias, mas por exigência da legislação ambiental e isso influencia positivamente em diversos ramos: geração de trabalho e renda, capacitação técnica, destinação adequada de resíduos e rejeitos; o que proporciona à empresa a economia de matérias-primas e energia, reduzindo desperdícios e aumentando a eficiência de suas atividades.

O Comitê Interministerial de Resíduos Sólidos, coordenado pelo Ministério do Meio Ambiente, visando o cumprimento da PNRS, implementou o Plano Nacional de Resíduos Sólidos que define metas, diretrizes e mecanismos para o manejo adequado dos resíduos em todo o país por empresas públicas e privadas pois o descumprimento dessa Lei acarreta em multas e autuações. As empresas, como visto, devem se adequar à nova Lei e isso influenciará diretamente a logística reversa das mesmas, a qual integra etapas industriais de modo que os resíduos gerados nos processos tornem-se fontes alternativas de renda, contribuindo assim para a sustentabilidade das atividades empresariais através da diminuição do impacto ambiental e social de seus descartes, reintroduzindo assim seus resíduos em outros sistemas produtivos³. Assim, as empresas estão buscando alternativas para uso mais nobres dos resíduos sólidos gerados pelo tratamento de efluentes, como a reciclagem dentro do próprio processo, além do tratamento e/ou classificação para serem utilizados como insumos em outros processos e produtos a fim de evitar ou reduzir passivos ambientais⁴.

Visando tratar, reduzir e caracterizar o resíduo sólido gerado por uma empresa, o presente trabalho teve por foco um ramo o qual, como citado por Menezes⁵, ‘apresenta um altíssimo consumo de água, estimado em torno de 10% no meio urbano’, as Lavanderias Industriais. Além disso, a importância relevante dessa indústria é devido à grande quantidade de água utilizada nos processos de lavagem (em torno de 10 m³ de água por tonelada de peça lavada⁶) e ao aumento da terceirização desse serviço por diversos setores (hospitais e hotelarias, entre diversos outros). No Brasil, principalmente, o crescimento da terceirização de lavagem tende a aumentar já que, segundo a Associação Nacional das Lavanderias do Brasil (Anel), a projeção de crescimento anual dessa indústria nos próximos 5 anos é de 5 a até 8% devido, majoritariamente, aos eventos esportivos da realização da Copa do Mundo em 2014 e Olimpíadas em 2016⁷.

O resíduo sólido gerado pelos processos da Lavanderia Industrial apresenta composição química complexa devido aos variados reagentes químicos utilizados nos procedimentos de lavagem e tratamento do efluente líquido ou mesmo pela própria composição da sujidade das roupas. Para a destinação final desse resíduo, as alternativas mais utilizadas são a secagem e desidratação, o aterro industrial, a incineração, a solidificação e estabilização, a compostagem e disposição em solos agrícolas e o “landfarming”, um sistema de tratamento de resíduos que promove a biodegradação, destoxificação, transformação e imobilização dos constituintes dos resíduos tratados⁸.

O custo do tratamento de esgoto e a disposição final de lodo afeta negativamente a rentabilidade de uma lavanderia industrial e tal fato explica a importância de pesquisa de métodos de tratamento a fim de diminuir a quantidade de resíduo sólido gerado e, além disso, agregar valor ao mesmo. Nos Estados Unidos foi realizado um estudo por GenChemUSA¹ que desenvolveu uma tecnologia inovadora (EUA Patente #7160470) a fim de diminuir a quantidade de lodo gerado e o custo do processo químico de tratamento do lodo. Para isso, utilizou de métodos de tratamento nos quais são feitos o uso de coagulantes catiônicos e floculantes aniônicos para dispensar a utilização de ácidos no ajuste pH a fim de reduzir a natureza alcalina característica do efluente de Lavanderias Industriais. Assim, o programa alcançou relevante sucesso ao ser estendido para diversas lavanderias norte-americanas as quais tratam de 2 a 3 milhões de litros de efluente por dia e geral um número estimado de redução de 11 milhões de quilos de resíduos sólidos por ano⁹.

Desta forma, a promoção de alterações eficazes e viáveis economicamente no processo de tratamento de efluentes com a substituição de coagulantes inorgânicos (Sulfato de Alumínio, por exemplo) por coagulantes orgânicos (Tanino) visando aumentar a biodegradabilidade do lodo gerado e diminuir sua emissão em tais indústrias fazem parte da gestão sustentável de resíduos sólidos a qual busca encontrar soluções efetivas e seguras para a disposição ou reaproveitamento dos mesmos¹⁰, podendo ou não agregar valor ao que, até então, era visto como despejo industrial e aumentar o lucro empresarial através de práticas sustentáveis.

OBJETIVOS

Esta pesquisa teve por modelo-base o estudo GenChemUSA objetivando diminuir a emissão de resíduos sólidos gerados pelos tratamentos físico-químicos do efluente e desenvolvimento metodologias alternativas pelo uso do coagulante orgânico Tanino aplicado na etapa de coagulação visando a substituição gradual do Sulfato de Alumínio a fim de gerar resíduos sólidos menos perigosos e mais biodegradáveis. Como objetivos secundários, teve-se a caracterização estrutural dos resíduos secos por espectroscopia de infravermelho e difratometria de raios X; caracterização térmica por termogravimetria e análise térmica diferencial e o estabelecimento de uma metodologia de tratamento físico químico do efluente proveniente da lavanderia industrial visando uma gestão sustentável de resíduos na lavanderia industrial, estudando métodos e possibilidades de reaproveitamento e agregação de valor ao produto descartado.

METODOLOGIA

Os lodos pesquisados e caracterizados nessa pesquisa foram provenientes do tratamento de efluente de uma Lavanderia Industrial (em suas duas Unidades) a qual atua na área de prestação de serviços a grandes empresas e realizam diversos processos industriais para lavagem das peças, os quais passam por amaciamentos e vão até desengomagem, passando por lavagens e estonagens.

1. Coleta e Amostragem do Efluente

A coleta dos efluentes provindos da lavanderia industrial foi realizada a fim de possibilitar uma amostragem do tipo composta visto que a variação das características do efluente é um fator constante. Os horários de coleta foram igualmente espaçados (3 h, 6 h, 9 h, 12 h, 15 h, 18 h, 21 h, e 00 h) a fim de possibilitar uma amostragem com elevada representatividade, de acordo com a Tabela 1.

¹ GenChemUSA: Líder em Tecnologia de Águas Residuárias especializado em Lavanderias Industriais

Tabela 1: Cronograma de coletas de amostras dos efluentes das duas unidades da Lavanderia Industrial.

Horário das Coletas	Unidade 1 Volume / mL	Unidade 2 Volume / mL
06 h	875	875
09 h	875	875
12 h	875	875
15 h	875	875
18 h	875	875
21 h	875	875
00 h	875	875
03 h	875	875
Total	7.000 mL / dia	7.000 mL / dia

Através da Tabela 1 pode-se inferir que a coleta de efluentes foi realizada de maneira uniforme e abrangente nas duas unidades da lavanderia industrial.

2. Caracterização do Efluente gerado no tratamento convencional do efluente da Lavanderia Industrial

A caracterização do efluente gerado nos processos de lavagem da Lavanderia Industrial e tratado pelo método convencional (vide Tabela 2) foi feita no efluente bruto (pré-tratamento) e no efluente tratado (pós-tratamento). Os testes para caracterização foram baseados na determinação do Índice de Turbidez, do Volume de Lodo gerado após meia hora de realização do tratamento, na determinação de pH, e de Sólidos Suspensos, Cobre Total, Demanda Bioquímica de Oxigênio, Demanda Química de Oxigênio, Cromo Total, Ferro Solúvel, Cor Aparente e Óleos e Graxas.

Tabela 2: Etapas do tratamento convencional utilizado atualmente na Lavanderia Industrial.

Etapa 1: Equalização Reagente: Hidróxido de Sódio (NaOH)
Etapa 2: Coagulação Reagente: Sulfato de Alumínio (Al ₂ (SO ₄) ₃)
Etapa 3: Alcalinização Reagente: Hidróxido de Cálcio (Ca(OH) ₂)
Etapa 4: Floculação Reagente: Polieletrólito Aniônico

3. Ensaio de Lixiviação do Resíduo Sólido gerado no tratamento convencional do efluente da Lavanderia Industrial

Para se determinar o comportamento do resíduo sólido numa situação na qual sofreria fenômenos de arraste, diluição e dessorção que ocorrem através da passagem natural de água (lixiviação), o teste de lixiviação foi empregado de acordo com a Norma Brasileira de Referência (NBR) 10005: 2004. Assim, permitiu a verificação do potencial de impacto do resíduo sólido gerado pelo tratamento convencional da Lavanderia Industrial em solos e águas subterrâneas pela liberação dos componentes constituintes do resíduo para o meio ambiente.

4. Ensaio de Solubilização do Resíduo Sólido gerado no tratamento convencional do efluente da Lavanderia Industrial

O teste de solubilização determina condições para a diferenciação dos resíduos sólidos inertes e não inertes. O método de referência para a classificação do Resíduo Sólido foi realizado com base na NBR 10006: 2004 e demonstrou o potencial do resíduo gerado no tratamento convencional da Indústria em liberar seus componentes para a água pura.

5. Classificação do Resíduo Sólido gerado no tratamento convencional do efluente da Lavanderia Industrial

O método de referência para a classificação do Resíduo Sólido foi realizado com base na NBR 10004: 2004 e permitiu classificar o resíduo gerado atualmente no tratamento de efluentes convencional da Lavanderia Industrial em perigoso ou não perigoso (inerte ou não inerte).

6. Tratamento do Efluente com metodologias alternativas propostas

Foram realizadas três diferentes metodologias de tratamento do efluente, sendo que todas elas visaram à substituição do coagulante Sulfato de Alumínio utilizado na metodologia convencional realizada atualmente na Lavanderia Industrial pelo Tanino. A Tabela 2 apresenta as etapas e reagentes utilizados pela metodologia convencional e a Tabela 3 mostra as metodologias alternativas utilizadas neste trabalho com os respectivos reagentes utilizados.

Tabela 2: Etapas do tratamento convencional utilizado atualmente na Lavanderia Industrial.

<p>Etapa 1: Equalização Reagente: Hidróxido de Sódio (NaOH)</p>
<p>Etapa 2: Coagulação Reagente: Sulfato de Alumínio ($Al_2(SO_4)_3$)</p>
<p>Etapa 3: Alcalinização Reagente: Hidróxido de Cálcio ($Ca(OH)_2$)</p>
<p>Etapa 4: Floculação Reagente: Polieletrólito Aniônico</p>

Tabela 3: Tratamentos alternativos propostos para o efluente de Lavanderia Industrial visando à substituição do Sulfato de Alumínio pelo Tanino.

Etapa	Reagentes		
	Metodologia 1	Metodologia 2	Metodologia 3
Equalização	Hidróxido de Sódio (NaOH)	Hidróxido de Sódio (NaOH)	Hidróxido de Sódio (NaOH)
Coagulação	Tanino	Tanino + Sulfato de Alumínio (Al ₂ (SO ₄) ₃)	Tanino
Alcalinizaçã o	Hidróxido de Cálcio (Ca(OH) ₂)	Hidróxido de Cálcio (Ca(OH) ₂)	
Floculação	Polieletrólito Aniônico	Polieletrólito Aniônico	

7. Caracterização do Resíduo Sólido gerado após o tratamento de Efluente pelas metodologias alternativas propostas

7.1. Determinação de Teor de Sólidos Totais

A determinação do Teor de Sólidos Totais se deu conforme a NBR 10664, onde o lodo gerado foi secado totalmente em temperatura ambiente (30 °C), sendo então pesado (m_1) e logo após a água remanescente foi evaporada em estufa a uma temperatura de 105 °C por 12 horas. Assim, o lodo foi esfriado em dessecador e pesado novamente (m_2) em balança com precisão de quatro casas decimais. Segue a Fórmula 1 (F1) utilizada para a determinação do Teor de Sólidos Totais:

$$\% \text{ de Resíduo Total} = (m_2 \times 100) / m_1 \quad (\text{F1})$$

7.2. Determinação de Teor de Sólidos Fixos e Sólidos Voláteis

A determinação do Teor de Sólidos Fixos e Voláteis se deu novamente conforme a NBR 10664, a partir dos resultados obtidos no item 'a'. Para se mensurar o Teor de Sólidos Fixos, o resíduo remanescente (de massa m_3) da estufa foi levado à mufla e submetido à calcinação a 550 °C (± 50 °C). O material restante representa a porcentagem de resíduo fixo frente ao resíduo total, seguindo a Fórmula F2, e a porcentagem de resíduo volátil é determinada pela diferença entre o teor de resíduos totais e fixos, determinada pela Fórmula 3 (F3).

$$\% \text{ Resíduo Fixo} = (m_3 \times 100) / m_2 \quad (\text{F2})$$

$$\% \text{ Resíduo Volátil} = 100 - (\% \text{ Resíduo Fixo}) \quad (\text{F3})$$

7.3. Caracterização térmica por termogravimetria TGA/DTA

As análises térmicas simultâneas termogravimétrica (TGA) e análise térmica diferencial (DTA) foram realizadas para se determinação do comportamento da decomposição térmica do resíduo sólido. A rotina de aquecimento de TGA / DTA se deu da temperatura ambiente (aproximadamente 25 °C) até 1000 °C, à taxa de 10 °C min⁻¹ utilizando-se atmosfera de N₂ para avaliar o percentual de redução de massa em atmosfera inerte.

7.4. Caracterização estrutural por Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier

Os espectros de infravermelho com transformada de Fourier (IV-TF) foram obtidos na região de 400 a 4000 cm⁻¹, utilizando-se pastilhas de Brometo de Potássio (KBr). Os pós dos lodos foram inicialmente secados e macerados em almofariz com um pistilo. As pastilhas foram prensadas (20 KN) na proporção de 1:100, proporção entre a amostra do lodo e KBr.

7.5. Caracterização estrutural por Difractometria de Raios X

A caracterização estrutural foi realizada por difratometria de raios-X, utilizando-se velocidade de varredura de 2° min⁻¹, 10° e 80°, com velocidade de passo igual a 0,02° s⁻¹. As medidas foram realizadas pelo método do pó, prensando o sólido com placa de vidro.

8. Estudo da viabilidade de reaproveitamento do Resíduo Sólido Gerado pelos tratamentos com as metodologias alternativas propostas

De acordo com o resultado da caracterização do Resíduo Sólido, foi feita Revisão na Literatura para avaliar o potencial de aproveitamento do resíduo sólido nos segmento energético, por geração de energia a partir do biogás liberado e uso agrícola como corretor de pH do solo e/ou fonte de nutrientes.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

1. Caracterização do Efluente gerado no tratamento convencional do efluente da Lavanderia Industrial

O efluente gerado pelo Tratamento de Efluentes de Lavanderia Industrial foi caracterizado de acordo com a Tabela 4¹¹.

Tabela 4: Características do Efluente gerado pelo Tratamento Convencional da Lavanderia Industrial.

Parâmetros	Pré-Tratado	Pós-Tratado	Padrão de Lançamento*
pH	8,12	8,33	5 - 9
Sólidos Suspensos/ mg L ⁻¹	> 1500	65	60
Cobre Total/ mg L ⁻¹	124,5	0,072	1
DBO/ mg L ⁻¹	41230	85	5
DQO/ mg L ⁻¹	81100	276	90
Cromo Total/ mg L ⁻¹	15,31	<0,002	0.5
Ferro Solúvel/ mg L ⁻¹	18,37	0,035	15
Óleos e Graxas/ mg L ⁻¹	39,442	18	20

*Resolução CONAMA 357, de 17 de março de 2005

Esse tratamento se mostrou eficiente, visto que o pH do efluente não se alterou durante o procedimento, houve uma redução eficiente da concentração de sólidos suspensos (o efluente pós tratado teve em torno de 4% de resíduos sólidos do pré tratado), Cobre Total, DBO, DQO, Cromo Total, Ferro Solúvel e Óleos e Graxas. Porém há dois parâmetros que não alcançaram o Padrão de lançamento de efluentes da Resolução CONAMA: Demandas Química e Bioquímica de Oxigênio (DQO e DBO), as quais obtiveram valores de 276 mg L⁻¹ e 85 mg L⁻¹, 3 vezes e 17 vezes maior do que o permitido, respectivamente. Uma alternativa viável para reduzir esses altos valores de DQO e DBO é realizar um posterior tratamento por processos oxidativos avançados com peróxido de hidrogênio¹².

2. Ensaio de Lixiviação do Resíduo Sólido gerado no tratamento convencional do efluente da Lavanderia Industrial

A Tabela 5 mostra os valores encontrados no Ensaio de Lixiviação da NBR 10005:2004¹³.

Tabela 5: Resultado do Ensaio de Lixiviação do Resíduo Sólido gerado pela Lavanderia Industrial em seu método convencional de tratamento de efluente.

	Unidade	Resultado
Arsênio	mg L ⁻¹	-
Bário	mg L ⁻¹	0,806
Cádmio	mg L ⁻¹	0,0026
Chumbo	mg L ⁻¹	0,112
Cromo	mg L ⁻¹	0,025
Fluoretos	mg L ⁻¹	0,9
Mercúrio	mg L ⁻¹	-
Prata	mg L ⁻¹	-
Selênio	mg L ⁻¹	-
pH		5

De acordo com a Tabela 5 há elementos traços como Cádmio, Bário, Chumbo, Cromo e Fluoretos, porém em concentrações ínfimas que não infringem a NBR. Portanto, o resíduo sólido gerado não tem o potencial de comprometer solos e águas subterrâneas, pois não há liberação para meio ambiente de nenhum dos componentes mensurados.

3. Ensaio de Solubilização do Resíduo Sólido gerado no tratamento convencional do efluente da Lavanderia Industrial

A Tabela 6 mostra os valores encontrados no Ensaio de Lixiviação da NBR 10005:2004 ¹²

Tabela 6: Resultado do Ensaio de Solubilização do Resíduo Sólido gerado pela Lavanderia Industrial em seu método convencional de tratamento de efluente.

	Unidad e	Resultado
Alumínio	Mg L ⁻¹	0,435
Arsênio	Mg L ⁻¹	-
Bário	Mg L ⁻¹	0,02
Cádmio	Mg L ⁻¹	-
Chumbo	Mg L ⁻¹	-
Cianeto	Mg L ⁻¹	0,0014
Cloretos	Mg L ⁻¹	26
Cobre	Mg L ⁻¹	0,0576
Cromo	Mg L ⁻¹	0,036
Fenóis	Mg L ⁻¹	0,023
Ferro Total	Mg L ⁻¹	0,157
Fluoretos	Mg L ⁻¹	0,74
Manganês	Mg L ⁻¹	0,0111
Mercurio	Mg L ⁻¹	-
Nitratos	Mg L ⁻¹	-
Prata	Mg L ⁻¹	-
Selênio	Mg L ⁻¹	-
Sódio	Mg L ⁻¹	93
Sulfatos	Mg L ⁻¹	18
Surfactantes Aniônicos	Mg L ⁻¹	5,65
Zinco	Mg L ⁻¹	0,059
pH		6,86

A Tabela 6 mostra os resultados do Ensaio de Solubilização, o qual considera diversos elementos que estão em concentrações permitidas pela NBR com exceção de três parâmetros os quais estão em desacordo com a Norma: a concentração de Alumínio, Fenóis e Surfactantes. O limite máximo do Alumínio permitido pela NBR 10004 é 0,2 mg.L⁻¹, Fenóis é 0,001 mg.L⁻¹ e Surfactantes é 0,20 mg.L⁻¹. Sendo assim, pode-se observar que de todos os elementos detectados em excesso, o mais crítico é o teor de Surfactantes, com em torno de 28 vezes mais a concentração permitida. Para diminuir essa concentração de contaminante, pode-se propor em nível industrial uma etapa adicional de pré-tratamento do efluente a fim de diminuir a concentração de surfactantes levados para a dorna de tratamento químico do efluente. A fração de surfactante que foi retirada, pode ser purificada e utilizada em diversos fins, tais como a remoção, limpeza e recuperação de hidrocarbonetos, melhoria da biodegradação de compostos orgânicos sorvidos no solo¹⁴ entre outras finalidades já conhecidas de detergente e dispersante.

4. Classificação do Resíduo Sólido gerado no tratamento convencional do efluente da Lavanderia Industrial

De acordo com os ensaios realizados, caracterizou-se o resíduo como Resíduo Não Perigoso Não Inerte (Classe II A)

5. Tratamento do Efluente com metodologias alternativas propostas

Nos Tratamentos alternativos que visaram à substituição do coagulante utilizado pelo Tanino os resultados, obtidos foram expressos em Índice de Turbidez e Volume de Lodo Formado, estão mostrados na Tabela 7:

Tabela 7: Caracterização da eficiência das Metodologias Alternativas propostas baseada no Índice de Turbidez (IT) e Volume de Lodo Formado (VLF).

	IT Inicial / NTU	IT Final / NTU	Remoção do Índice de Turbidez / %	VLF* / mL
Metodologia 1	1350	35	97,4	475
Metodologia 2	1350	20	98,51	380
Metodologia 3	1350	80	94,07	400

* a cada 1000 mL de Efluente Tratado

Observa-se que o uso dos coagulantes Tanino e Sulfato de Alumínio em conjunto na proporção 1:1 conferem a Metodologia 2 a maior eficiência na Remoção do Índice de Turbidez e, além disso, menor volume de lodo formado por efluente tratado. Porém tal Metodologia faz uso do coagulante inorgânico (o qual proporciona um resíduo sólido com maior teor de Alumínio, mesmo que em menor proporção de quando comparado a Metodologia Convencional. Assim, visualizando o uso somente do Tanino, podemos comparar as Metodologias 1 e 3: sendo que a metodologia 3 difere da Metodologia 1 pois a Metodologia 3 não contém etapas de alcalinização e floculação ineficientes visto o resultado desta Metodologia que contou somente com a etapa de equalização e coagulação para gerar uma menor carga de lodo e um menor Índice de Turbidez.

6. Caracterização do Resíduo Sólido gerado após o tratamento de Efluente pelas metodologias alternativas propostas

6.1. Determinação do Teor de Sólidos Fixos e Sólidos Voláteis

Os resultados obtidos nos resíduos sólidos provenientes das três diferentes metodologias de tratamento de efluente (demonstradas novamente na Figura 3) são expressos na Tabela 8.

Tabela 8: Tratamentos alternativos propostos para o efluente de Lavanderia Industrial visando a substituição do Sulfato de Alumínio pelo Tanino.

Etapa	Reagentes		
	Metodologia 1	Metodologia 2	Metodologia 3
Equalização	Hidróxido de Sódio (NaOH)	Hidróxido de Sódio (NaOH)	Hidróxido de Sódio (NaOH)
Coagulação	Tanino	Tanino + Sulfato de Alumínio (Al ₂ (SO ₄) ₃)	Tanino
Alcalinização	Hidróxido de Cálcio (Ca(OH) ₂)	Hidróxido de Cálcio (Ca(OH) ₂)	
Floculação	Polieletrólito Aniônico	Polieletrólito Aniônico	

Tabela 9: Porcentagens de Resíduos Fixos e Voláteis obtidas nos Resíduos Sólidos provenientes de diferentes metodologias de tratamento de efluente.

	% Resíduos Fixos	% Resíduos Voláteis
Metodologia 1	99,3128	0,6872
Metodologia 2	99,2481	0,7519
Metodologia 3	85,2098	14,7902

De acordo com as Tabelas 8 e a 9, pode-se notar que, como na Metodologia 3 foram empregados somente 2 reagentes (sendo que o tanino é biodegradável, uma porcentagem estimada de 85% de Sólidos Fixos (em torno de 85%) de todas as metodologias são provenientes do efluente, e não dos reagentes empregados no seu tratamento. Ao se empregar reagentes inorgânicos, como o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e Polieletrólito Aniônico a porcentagem de Sólidos Fixos aumenta consideravelmente, chegando a mais de 99%, tornando o lodo predominantemente inorgânico e não biodegradável, dificultando o seu reaproveitamento. Para viabilizar, portanto, o reaproveitamento do lodo é necessário ser feito um tratamento onde os reagentes empregados sejam de origem orgânica e biodegradável, visto que as características intrínsecas do efluente de lavanderia industrial já fazem do seu lodo um resíduo majoritariamente inorgânico.

6.2. Caracterização térmica dos resíduos sólidos gerados por termogravimetria TGA/DTA.

A análise termogravimétrica foi realizada para identificar o ganho ou a perda de massa da amostra de resíduo sólido em uma dada faixa de temperatura. Quando acopla-se essa análise com a análise térmica diferencial, pode-se prever com mais embasamento de dados o tipo de reação que ocorreu. No geral, portanto, o ensaio TGA/DTA é utilizado para determinar a natureza e a temperatura de degradação dos materiais, podendo quantificá-los pela perda de sua respectiva massa com a temperatura, no caso da pesquisa, no resíduo sólido gerado pelas diferentes metodologias.

A caracterização térmica dos resíduos sólidos provenientes das três metodologias propostas de tratamento está demonstrada na Figura 1.

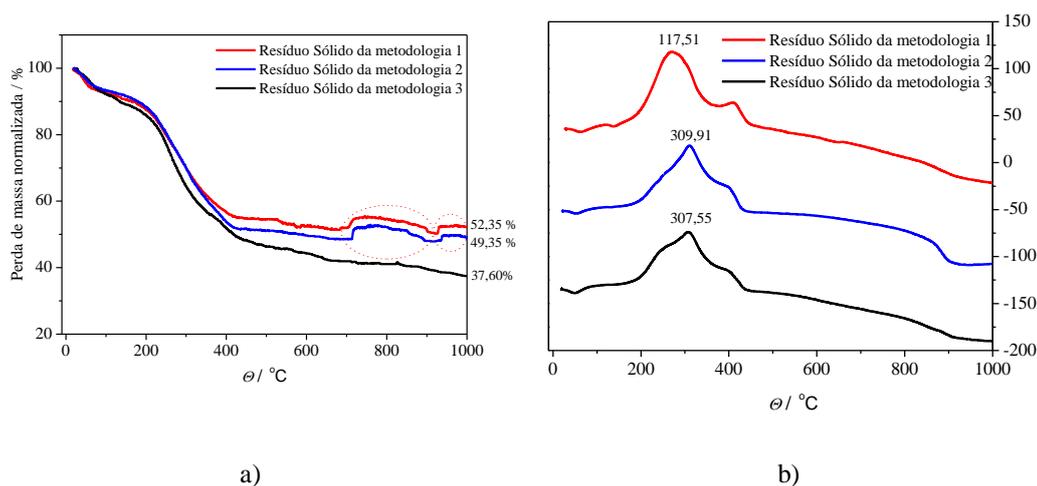


Figura 1: a) Curvas termogravimétricas das amostras de Resíduos Sólidos realizadas de 25 °C até 1000 °C, à taxa de 10 °C min⁻¹ utilizando-se atmosfera de N₂ e b) Curvas térmicas diferenciais das amostras de Resíduos Sólidos.

Nas curvas Termogravimétrica e de Análise térmica Diferencial verifica-se eventos que são explicados segundo alguns autores¹⁵. Até 160 °C são verificados eventos de desidratação no lodo. De 160 °C a 350 °C ocorrem eventos de decomposição de material biodegradável com cadeia molecular mais curta, juntamente com compostos semivoláteis. De 350 °C a em torno de 500 °C é notada a decomposição de polímeros orgânicos e compostos com uma cadeia molecular maior, enquanto que até 660 °C há a decomposição de uma fração pequena de material de difícil biodegradabilidade. Os eventos notados acima de 660 °C compreendem reações que ocorrem durante o processo de aquecimento, nas quais substâncias reagem entre si e há uma oxidação das cinzas além de haver a redução de materiais inorgânicos, o que explica a notável elevação da

massa. De acordo com a Figura 1 a), nota-se, um comportamento semelhante dos resíduos sólidos provenientes das metodologias 1 e 2, o qual está destacado e pode-se inferir, pelos tratamentos, que este comportamento se deve a presença de Hidróxido de Cálcio e Polieletrólito Aniônico. No geral, quando são analisadas as diferenciais das curvas termogravimétricas, pode-se notar que há um comportamento parecido nos resíduos provenientes das três metodologias, porém o pico das metodologias 2 e 3 é em torno de 300 °C (309,91 °C e 307,55 °C, respectivamente) enquanto que o pico da metodologia 1 se deu em 117,51 °C. A amostra provinda da metodologia 2 chegou a 1000 °C com um percentual pouco menor de massa de 49,35% e a da metodologia 1 com 52,35. Finalmente, a metodologia 3 teve maior percentual de perda de massa, chegando a 1000 °C com 37,60% da massa inicial provavelmente por possuir em sua composição o coagulante tanino, não apresentando Polieletrólito e nem Hidróxido de Cálcio.

6.3. Caracterização estrutural dos resíduos sólidos por Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier.

Baseado no acoplamento da frequência de vibração de radiação infravermelha e frequência vibracional da matéria, quando a radiação infravermelha é absorvida pela amostra se converte em energia vibracional molecular, e somente as vibrações que resultam em uma vibração do momento dipolar da molécula são ativas no infravermelho. A energia radiante, então, por meio de seu efeito térmico é detectada e computacionada por meio da transformada de Fourier: assim será fornecido um espectro de absorção, o qual caracteriza a amostra quanto à intensidade em relação ao comprimento de onda¹⁶. A caracterização estrutural dos resíduos sólidos provenientes dos 3 tratamentos alternativos propostos realizada por Espectroscopia no Infravermelho é mostrada na Figura 2.

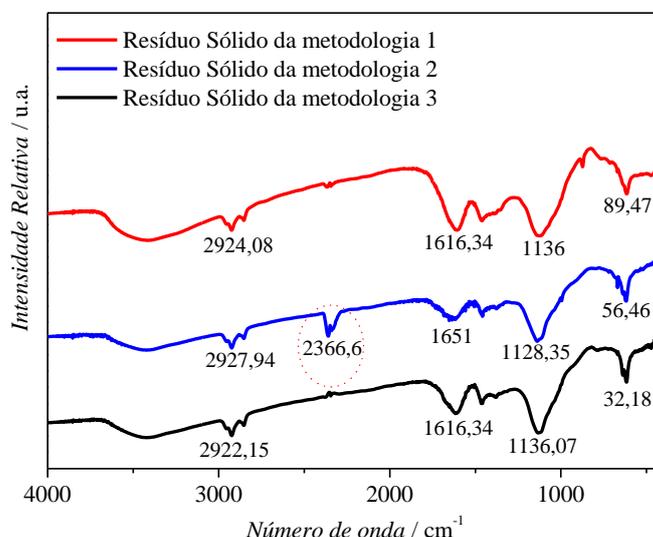


Figura 2: Curva de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier das amostras de Resíduos Sólidos provenientes das 3 metodologias de tratamento de efluente propostas.

Nos espectros de infravermelho observam-se semelhanças entre os sólidos obtidos para as três metodologias, sendo possível notar tais espectros característicos de estruturas de taninos, provavelmente por conter este composto em maior proporção. Com base nos gráficos obtidos e no estudo de uma literatura específica¹⁷, pode-se estimar a presença de alguns prováveis componentes nas amostras estudadas. O pico de absorção próximo a 3000 cm⁻¹ caracteriza provavelmente uma vibração C-H do tipo alifática. A banda de absorção apresentada em todas as amostras de 1650 a 1850 cm⁻¹ caracteriza a presença de C=O. É comprometedor inferir a presença de água na amostra, pois enquanto a análise do infravermelho não mostrou picos entre 3340-3700 cm⁻¹, característicos do íon hidroxila, há um pico característico de água e carboxilatos (1635 a 1640 cm⁻¹). O pico na faixa de 2370 a 2375 cm⁻¹ pode ser devido a ácidos carboxílicos não ionizados na amostra. Por fim, um pico característico na faixa de 787 ou 667 cm⁻¹, observado caracteriza a presença de amina secundária, provavelmente cedida pelo coagulante Tanino.

Os espectros de Infravermelho dos resíduos sólidos se mostram semelhante nos três casos, com quatro picos similares, por volta de 2920 cm^{-1} , devido ao estiramento C-H, 1620 cm^{-1} , devido a C=H, 1130 cm^{-1} correspondente a C-O e o último menor que 90 cm^{-1} provavelmente provindo de uma hidroxila (O-H). Nota-se um pico a mais na região de 236.66 cm^{-1} no resíduo proveniente da metodologia 2, o qual provavelmente se deve a ligação química de um único reagente na qual a difere na qual essa metodologia das outras: o Sulfato de Alumínio.

Pode-se concluir, portanto, que há indícios de ácidos carboxílicos na amostra, porém a substância a qual certamente está presente é o coagulante Tanino, o qual foi utilizado em todas as metodologias alternativas de tratamento sendo proposto como coagulante em substituição ao Sulfato de Alumínio.

6.4. Caracterização estrutural dos resíduos sólidos gerados por Difratomia de Raios X.

A difração de raios X é o fenômeno de espelhamento da radiação eletromagnética a qual é provocada pela interação entre feixe de raios-X incidente e elétrons dos átomos que compõe a amostra de resíduo sólido¹⁸. Os difratogramas de Raio X das amostras provindas das metodologias alternativas são mostrados na Figura 3.

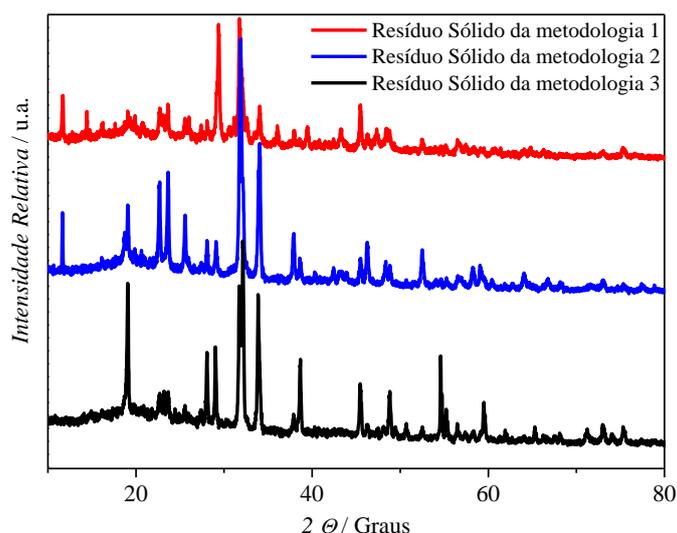


Figura 3: Difratogramas de Raio X das amostras de Resíduos Sólidos.

Nos difratogramas de raios X verifica-se que, em todos os casos, houve a formação de mistura de fases cristalinas, sendo na maioria, referentes a Óxidos de Sódio¹⁹. As análises obtidas por difratometria de raios X e a espectroscopia de absorção na região do infravermelho são técnicas auxiliares usadas para identificação estrutural dos resíduos sólidos obtidos, como técnicas auxiliares dos resultados das técnicas termoanalíticas¹⁹.

7. Estudo da viabilidade de reaproveitamento do Resíduo Sólido Gerado pelos tratamentos com as metodologias alternativas propostas

7.1. Potencial do Resíduo Sólido para aproveitamento de Biogás e geração de Energia Elétrica

Autores²⁰ dizem que a utilização do biogás é uma fonte alternativa para geração de energia, além de ser um forte candidato para projetos de comercialização de créditos de carbono. Na União Européia, muitos países estão investindo significativamente em projetos de geração de energia com biogás para reduzir as emissões de gases que causam efeito estufa.

O biogás é uma fonte de energia renovável e subproduto da decomposição microbiana de resíduos sólidos, sendo compostos por uma mistura gasosa rica em metano, o qual é o componente predominante do gás natural combustível (atualmente importado da Bolívia pelo Brasil) utilizado para geração de eletricidade, calor em indústrias e abastecimento doméstico e comercial (substituindo o gás liquefeito de petróleo).

Essa forma de aproveitamento do Resíduo Sólido constitui-se numa alternativa interessante, uma vez que sabemos que o crescimento econômico demanda cada vez mais energia. Como a geração de biogás é resultado da decomposição da matéria orgânica presente no lodo sob condições anaeróbicas é necessária a adequação do tratamento para se aumentar a porcentagem de resíduos voláteis no processo, conseguida através de pré-tratamentos do efluente para retirar uma relevante parcela de compostos inorgânicos e a utilização de reagentes biodegradáveis no tratamento do efluente, como o Tanino.

7.2 Potencial Uso Agrícola

A literatura é carente de informações sobre o desempenho de vegetais submetidos a aplicação de resíduos sólidos de lavanderias industriais. Tal resíduo pode ser utilizado como fonte de nutrientes para plantas ou como corretivo da acidez do solo, dependendo da composição química do lodo. Porém para isso é necessário um estudo das alterações físico-químicas causadas no solo, além do crescimento e desenvolvimento da vegetação.

De acordo com o presente trabalho, o Resíduo Sólido gerado pela Lavanderia Industrial não possui potencial de poluição por metais pesados, o que faz com que possa ser um potencial corretor de elementos do solo, mas para isso deve ocorrer a diminuição de elementos excedentes da NBR (Surfactantes, Alumínio e Fenóis).

Como já foi demonstrado em estudos^{21 22}, o lodo industrial têxtil e de lavanderia pode ser usado em terras cultiváveis para uso corretivo do solo e para aumentar a eficiência no beneficiamento de terras o lodo deve possuir maior porcentagem de matéria orgânica, para que possa ocorrer digestão aeróbia e gerar húmus.

CONCLUSÕES

Com base na pesquisa, pode-se concluir:

1. Segundo a Resolução CONAMA 357, de 17 de março de 2005, o tratamento convencional realizado atualmente na Lavanderia Industrial é eficaz sob diversos aspectos (pH, Sólidos Suspensos, Cobre Total, Cromo Total, Ferro Solúvel e Óleos e Graxas) e cria condições de despejo a corpos hídricos sem alteração de sua qualidade, podendo servir também para reuso da água dentro da própria indústria, porém não é eficiente em parâmetros fundamentais como DQO e DBO além de produzir um resíduo sólido inorgânico, dificultando seu reaproveitamento;
2. De acordo com os ensaios realizados, o resíduo sólido gerado pelo tratamento de efluentes da Lavanderia Industrial é Resíduo Não Perigoso Não Inerte (Classe II A). Tal lodo não tem o potencial de comprometer solos e águas subterrâneas porém o Ensaio de Solubilização demonstrou que há três parâmetros em desacordo com a NBR 10004: Alumínio, Fenóis e Surfactantes;
3. A Metodologia alternativa sugerida pela pesquisa que contou com os reagentes NaOH, Tanino, $Al_2(SO_4)_3$, $Ca(OH)_2$ e Polieletrólito Aniônico se mostrou a mais eficiente dentre as três metodologias propostas na remoção do índice de turbidez (alcançando 98,51%) e no menor volume de lodo formado (380 mL) por litro de efluente tratado;
4. A eficiência conseguida pelo tratamento com a Metodologia proposta utilizando dois tipos de coagulante provou que ser viável a associação dos coagulantes orgânico e inorgânico, Tanino e $Al_2(SO_4)_3$, respectivamente, de forma a produzir um resíduo sólido menos poluente que o gerado pela metodologia convencional utilizada na Lavanderia Industrial;
5. Os espectros de Infravermelho dos resíduos sólidos provenientes das três metodologias alternativas as quais foram propostas visando substituir o $Al_2(SO_4)_3$ pelo Tanino se mostram semelhantes com picos justificados pelos estiramentos C-H, C=H, C-O e O-H. A única metodologia que contou com a utilização de $Al_2(SO_4)_3$ obteve um pico a mais provavelmente justificado por ligação química desse componente. Pelos difratogramas de raios X pode-se verificar que, em todos os casos, houve a formação de mistura de fases cristalinas, sendo na maioria, referentes a Óxidos de Sódio.

6. O tratamento que contou somente com a aplicação do coagulante orgânico em um pH ajustado com NaOH foi o que produziu um resíduo sólido com maior percentual de material volátil (e biodegradável, visto que a maior parte do material volátil é composta por Tanino) e de acordo com dados de análises térmicas TGA/DTA teve maior percentual de perda de massa, chegando a 1000 °C com 37,60%. Esse tratamento apresenta vantagens como a inexistência de metais remanescentes na água tratada e no lodo gerado ao fim do processo de tratamento, facilitando à disposição final do mesmo ou a sua utilização para fins mais específicos, como a compostagem, por exemplo;

7. Para viabilizar o reaproveitamento do lodo gerado em Lavanderias Industriais é necessário ser feito um tratamento onde os reagentes empregados sejam de origem orgânica e biodegradável, visto que as características intrínsecas do efluente desse tipo de indústria já fazem do seu lodo um resíduo majoritariamente inorgânico;

8. Uma vez submetido a etapas adicionais de pré-tratamento, o efluente quando tratado com reagentes biodegradáveis pode ser utilizado para fins de uso agrícola como corretivos de pH ou fonte de nutrientes e para fins energéticos, quando se visa a agregação de valor ao biogás produzido por sua digestão anaeróbia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

¹ Clóvis Cavalcanti (Org.) André Furtado *et. al* . **Desenvolvimento e Natureza: Estudos para uma sociedade sustentável**. INPSO/FUNDAJ, Instituto de Pesquisas Sociais, Fundação Joaquim Nabuco, Ministério de Educação, Governo Federal, Recife, Brasil. Outubro 1994. p. 262. Disponível em <http://168.96.200.17/ar/libros/brasil/pesqui/cavalcanti.rtf> consultado em 21.02.2012

² <http://www.ufpa.br/beiradorio/arquivo/beira12/noticias/noticia8.htm> acessado em 12.09.11

³ Antonio Silvio Hendges, **As empresas e a Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei 12.305/2010**, Ecodebate Cidadania e Meio Ambiente, disponível em <http://www.ecodebate.com.br/2010/08/13/as-empresas-e-a-politica-nacional-de-residuos-solidos-lei-12-3052010-artigo-de-antonio-silvio-hendges/>

⁴ Kawatoko, I. E. S., 2011 *apud* Balnino Junior *et al.*, 2006, **Propostas de tratamento para o lodo de reciclagem de papel em uma indústria de pequeno porte**. Espírito Santo do Pinhal, 2006

⁵ Menezes, J.C.S.S. **Tratamento e Reciclagem do Efluente de uma Lavanderia Industrial** Mestrado em Engenharia de Minas, Porto Alegre, 2005.

⁶ www.sindilav.com.br consultado em 02.03.2012

⁷

http://www.istoedinheiro.com.br/noticias/58661_LAVANDERIAS+PREVEEM+CRESCIMENTO+DE+8+A+O+ANO+ATE+2016

⁸ **Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais**, Fundo Nacional do Meio Ambiente, Governo do Estado do Rio Grande do Sul disponível em <http://www2.al.rs.gov.br/forumdemocratico/LinkClick.aspx?fileticket=g4ehaPC7VGg%3D&tabid=3230&mid=4650> (acessado em 03/2012)

⁹ Davis, S. and Davis, R. Reduction in Generation of Laundry Sludge, disponível em http://genchemusa.com/article_reduction.html (acessado em 04/2012)

¹⁰ Castro, T. M. **Solidificação / Estabilização de lodo gerado no tratamento de Efluente de uma lavanderia industrial têxtil em blocos cerâmicos acústicos e seu desempenho em câmara reverberante**, Maringá, 2010.

¹¹ Alco Toalheiros do Brasil - **Boletim Analítico nº 12328/2011-1.0** Laboratório Operador Meio Ambiente

¹² Scal, M. L. W. **Estudo de tecnologias para tratamento de efluentes de produção de papel reciclado de uma gráfica de pequeno porte localizada no município do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, 2010.

¹³ **Relatório de Ensaio número 146613-0** emitido para o contratante Alco Toalheiros Brasil LTDA, Identificação Ecolabor 507712 do dia 07.06.2011

¹⁴ Millioli, V. S. **Avaliação da potencialidade da utilização de surfactantes na biorremediação de solo contaminado com hidrocarbonetos de petróleo**, Programa EQ – ANP, Abril/2009

¹⁵ Borges, F. *et al* **Caracterização e avaliação de lodos de efluentes sanitário e industrial como biomassa na geração de energia** Programa de Mestrado em Engenharia de Processos, UNIVILLE *apud* FONT *et al*, 2001; GÓMEZ-RICO *et al*, 2005; ZHU *et al*, 2007

¹⁶ Idalgo, E. **Propriedades térmicas e estruturais de vidros teluretos**. Ilha Solteira, 2009

¹⁷ 47 Smidt, E.; Meissl, K. **The applicability of Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy in waste management**. Waste Management, v. 27, p. 268-276, 2007

¹⁸ www.eq.ufrj.br/docentes/donato_web/arquivos/drx.ppt acessado em 01.05.2012

¹⁹ Almeida, S. **Estudo Térmico e Caracterização Química de Amostras de Resíduos Sólidos de Aterro Sanitário**, Araraquara, 2007.

²⁰ Britto, M. L. C. P. S. **Taxa de emissão de biogás e parâmetros de biodegradação de resíduos sólidos urbanos no aterro metropolitano centro**. UEBA, Salvador, 2006.

²¹ Araújo, A. S. F. *et. al* **Composto de lodo têxtil em plântulas de soja e trigo**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.40, n.6, p.549-554, 2005.

²² Carvalho, G. S. **Atributos químicos de um latossolo vermelho tratado com resíduo têxtil** Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal, v. 8, n. 1, p. 164-176, jan. /mar . 2011