

Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

ESTUDO TEÓRICO SOBRE ALTERNATIVAS DE TRATAMENTOS
E APLICAÇÕES PARA LODO GERADO EM PROCESSO
DE RECICLAGEM MECÂNICA DE FRALDAS
DESCARTÁVEIS PÓS-CONSUMO

Stephanie Walker Bradfield

Prof. Dr. Marcus César Avezum Alves de Castro

Rio Claro (SP)

2017

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

STEPHANIE WALKER BRADFIELD

ESTUDO TEÓRICO SOBRE ALTERNATIVAS
DE TRATAMENTOS E APLICAÇÕES PARA LODO
GERADO EM PROCESSO DE RECICLAGEM MECÂNICA
DE FRALDAS DESCARTÁVEIS PÓS-CONSUMO

Trabalho de Formatura
apresentado ao Instituto de
Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista
Júlio de Mesquita Filho, para
obtenção do grau de Engenharia
Ambiental.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Marcus César Avezum Alves de Castro (orientador)

Profa. Dra. Vania Silvia Rosolen

Eng. Luis Henrique Ramos

Rio Claro, 05 de Junho de 2017.

Assinatura da aluna

Assinatura do orientador

604.6 Bradfield, Stephanie Walker
B799e Estudo teórico sobre alternativas de tratamentos e aplicações para lodo
 gerado em processo de reciclagem mecânica de fraldas descartáveis
 pós-consumo / Stephanie Walker Bradfield. - Rio Claro, 2017
 76 f. : il., figs., gráfs., tabs., quadros

 Trabalho de conclusão de curso (Engenharia ambiental) - Universidade
 Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas
 Orientador: Marcus César Avezum Alves de Castro

 1. Resíduos. 2. Resíduo sólido. 3. Fralda descartável. I. Título.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Marcão, uma peça muito importante na minha graduação e, com certeza, na d@s demais alun@s. Por muitas horas de conversa, mudança de tema e reviravoltas, você permaneceu ao meu lado, sempre prezando por um bom trabalho.

À Profa. Vania Silvia Rosolen, acima de tudo mulher, uma professora inspiradora para todos nós. Nos fez sair do óbvio e do esperado, rompendo com a ‘quadradice’ da academia.

Ao Jose, por ter topado esse desafio de última hora e pela contribuição muito bem-vinda no trabalho!

Ao Vladimir, técnico do laboratório da Geologia onde, gentilmente, me deixou realizar as análises. Salvou!

Ao André Kenji, que foi meu tutor nesta caminhada longa, porém curta, sempre me orientando e me trazendo lucidez nos momentos de confusão.

À Milena, querida companheira de trabalho, que vem se tornando uma amiga para a vida. Com seus dotes de pesquisadora, me ajudou em muito nesta caminhada cheia de percalços.

Ao Luizinho, peça essencial neste projeto todo, sempre de boa vontade para ajudar!

À WiseWaste/Boomera, por ter aberto muitas portas, como a oportunidade de realizar este projeto, mais um que vem para romper a barreira do convencional, tentando deixar este mundo um pouco mais circular.

À mamãe querida do coração, Jacqueline, sempre ‘mãe-coruja’ preocupada se eu iria conseguir me formar logo. E não é que deu certo? Obrigada por todo o apoio e colinhos sempre que precisei! Agora vamos as duas relaxar, merecidamente!

Ao meu pai, Dennis, sempre disposto a ouvir “papo chato sobre lixo”, me ensinando e aprendendo junto de mim.

Ao meu irmão, Lucca, pelas risadas. Foi com você que chorei de “frio na barriga” e insegurança na véspera da minha mudança pra Rio Claro, quando você me acalmou, dizendo que seria muito bom, pra eu não me preocupar. Acertou na mosca!

Ao Rapha, porque sem você eu não teria tido a audácia de me jogar num tema novo faltando 4 meses para entrega. Obrigada por todos os colinhos nas horas de desespero! Você foi essencial para tudo isso, gatinho. Sou grata todos os dias por você ter aparecido, assim do nada, na minha vida.

À minha família, grande, presente e amorosa! Apesar de confundirem Rio Claro com São Carlos até hoje, me apoiaram sempre nesta minha escolha.

À minha vó, Maria, que misteriosamente esteve presente comigo, me dando forças nessa reta final. Muitas saudades, vovó.

Às minhas amigas e meus amigos de São Paulo, sempre achando graça das expressões e das histórias do interior. Amo vocês!

À mais perfeita rep. Cabeças. O que teria sido minha vida sem ter morado nesse antro de amor, loucura, sororidade, compreensão e louça exponencial?!

“Se cobrir vira circo, se cercar vira hospício”.

Às veteranas queridas, que me ensinaram muito, e às bixotas lindas, a quem espero ter ensinado alguma coisinha. Cada uma de vocês é uma irmã para toda a vida.

À Kiki, que passou por todas as fases, as boas e as difíceis, junto de mim. E agora essa nova fase que está diante de nós, e que assusta um pouco, mas sei que poderei te ligar sempre que necessário pra pedir conselhos e reclamar sobre a vida adulta!

À Dona Irani, que sempre cuidou tão bem de nós e aguentou nossa bagunça por tantos anos, sendo uma figura muito importante na minha vida universitária.

Às amigas lobas, Lari, Alanita, Ju, Juzi, Fê, Ana, pois com vocês eu aprendi sobre a beleza de ser mulher, da cantoria em volta da fogueira em noite de lua cheia. “Somos as netas das bruxas que vocês não conseguiram queimar”.

Aos querid@s coleguitas de classe, que fizeram destes 5, 6, 7 anos os melhores da minha vida. EA 2011 estará sempre na memória!

A Rio Claro, por ter mudado minha vida para sempre (DIAS, 2016).

EPIGRAFE

“Tudo vale a pena quando a alma não é pequena.”

Fernando Pessoa

RESUMO

O uso, e conseqüente descarte, de fraldas descartáveis infantis consiste em um problema ambiental presente em nossa sociedade, tanto pelo seu elevado volume quanto pela complexidade do resíduo. Estima-se que 2% dos RSU no Brasil sejam fraldas usadas e, hoje, a única alternativa de disposição final para este resíduo é o aterramento. Frente a este desafio, há um projeto de reciclagem mecânica de fraldas pós-consumo sendo desenvolvido, com objetivo de dar uma vida mais longa às matérias-primas presentes no resíduo, tal como o plástico e a celulose. No entanto, é necessário encontrar opções de tratamentos e destinação adequados para a fração orgânica da fralda, composta principalmente pelos excrementos, pelo polímero superabsorvente e água. Algumas características do lodo foram analisadas, tal como a DBO e DQO, o teor de umidade e os sólidos (ST, SV e SF), uma vez que estes parâmetros norteiam a escolha do tratamento e destinação do lodo. Foi realizado um estudo teórico de alternativas de aplicações finais para o lodo beneficiado. Os processos que foram sugeridos como mais ideais para beneficiamento deste resíduo da reciclagem de fraldas foram: adensamento, calagem e secagem. Estudos mais aprofundados serão necessários para se investigar a viabilidade da aplicação do lodo beneficiado no solo, como fertilizante ou condicionador de solos, ou no reuso industrial. Uma terceira opção de destinação final para o lodo beneficiado seria o aterro sanitário.

Palavras-chave: Resíduo sólido. Fralda descartável. Reciclagem. Lodo.

ABSTRACT

The use, and therefore discard, of disposable baby diapers create an environmental problem in our society, due to its high volume and complexity. It is estimated that 2% of Brazilian's MSW (Municipal Solid Waste) are used disposable diapers which are, today, sent to landfills as the only available option of disposal. Facing this challenge, there is a project of mechanical recycling of post-consumption diapers being developed, aiming to give longer life to raw materials present in this waste, such as plastic and cellulose. However, it is necessary to find treatment and final application options to the organic fraction, which is composed primarily by excrement, superabsorbent polymer and water. Some of the sludge properties were analyzed, such as the BOD and COD, the moisture content and the solids (TS, VS and FS), since these parameters help guide the discussion on treatment processes and sludge disposal. Treatment processes commonly used for sewage sludge have been studied, in order to obtain a sludge that is suitable for some final destinations. Therefore, it was conducted a theoretical study of alternatives of final applications for the resulting sludge. The processes that have been suggested as more ideal for treating this residue from diaper recycling were: thickening, alkaline stabilisation and dewatering. Deeper studies are required to investigate the viability of applying the resulting sludge on the following areas: use on the ground as fertilizer or soil conditioner and industrial reuse. A third option of destination is to send the resulting sludge to landfills.

Keywords: Solid waste. Disposable diaper. Recycling. Sludge.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Composição gravimétrica dos RSU coletados no Brasil. Dados referentes ao ano de 2008.	7
Gráfico 2 - Disposição final de RSU no Brasil por tipo de destinação (t/dia).....	8
Gráfico 3 - Redução do peso médio da fralda descartável entre 1987 e 2004.....	13
Gráfico 4 - Composição, por contribuição de cada material por peso, de uma fralda descartável comum, no ano de 2013.	15
Gráfico 5 - Produção e consumo de fraldas descartáveis no Brasil, ao longo da década de 1990.....	27
Gráfico 6- Variação do volume de lodo em função do seu teor de água.....	44

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais marcos na história da evolução das fraldas.....	12
Quadro 2 - Limites máximos de concentração de microorganismos, pela Resolução CONAMA nº375.	41
Quadro 3 - Parâmetros necessários para a caracterização do lodo segundo norma técnica CETESB, P4.230 de 1999.	42
Quadro 4 - Tecnologias de estabilização de lodos, e respectivas disposições finais.	45
Quadro 5 - Normas utilizadas para análise dos parâmetros de DBO e DQO.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estimativa da parcela referente às fraldas descartáveis no RSU gerado no Brasil.	27
Tabela 2 - Resultados das análises laboratoriais de DBO e DQO.	56
Tabela 3 - Resultados da série de sólidos (ST, SF e SV) para o SAP seco e hidratado.	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho esquemático de uma fralda descartável, com seus principais elementos.....	14
Figura 2 - Estruturas dos monômeros de poliacrilato de sódio e de poliacrilamida, respectivamente.	16
Figura 3 - SAP seco, em grão, e SAP hidratado com água destilada, respectivamente.	17
Figura 4 - Fluxograma que indica as etapas de vida de uma fralda descartável, do “berço ao túmulo”, seguindo uma estrutura linear.	29
Figura 5 - Diagrama sistêmico da economia circular, com o ciclo biológico à esquerda e o técnico, à direita.	30
Figura 6 - Fluxograma do processo de reciclagem de fraldas pós-consumo da Knowaste.....	31
Figura 7 - Fluxograma do processo de reciclagem de fraldas pós-consumo estudado.	34
Figura 8 - Imagem tirada do efluente na saída da máquina, onde as fraldas descartáveis são trituradas e lavadas.	35
Figura 9 - Material a ser reciclado, composto por plástico e fibras de celulose.....	36
Figura 10 - Fralda descartável cortada, para obtenção do SAP.....	51
Figura 11 - Amostra de SAP seco e de SAP hidratado, respectivamente.....	52
Figura 12 - Cadinhos com amostras dentro da estufa.....	53
Figura 13 - Cadinhos com amostras após calcinação (direito inferior, com amostra de SAP seco, e demais, com amostra de lodo).....	54
Figura 14 - Resultados da série de sólidos (ST, SF e SV) para o lodo, em valores médios.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Análise de ciclo de vida
BSKP	<i>Bleached softwood kraft pulp</i> (celulose kraft branqueada de fibra longa)
CETESB	Companhia Ambiental Do Estado De São Paulo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COT	Carbono orgânico total
EPA	Environmental Protection Agency (Agência de proteção ambiental)
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
EUA	Estados Unidos da América
NBR	Norma Brasileira Registrada
OMS	Organização Mundial de Saúde
PA	Poliacrilamida
PAS	Poliacrilato de sódio
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de alta densidade
PEBD	Polietileno de baixa densidade
PIB	Produto Interno Bruto
PLA	Ácido polilático
PNRS	Política Nacional dos Resíduos Sólidos
POP	Poluente orgânico persistente
PP	Polipropileno
RSU	Resíduo Sólido Urbano
SAP	<i>Superabsorbent Polymer</i> (Polímero superabsorvente)
TNT	Tecido não-tecido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	4
2.1 Objetivo geral.....	4
2.2 Objetivos específicos	4
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 Resíduos sólidos	5
3.1.1 Definições	5
3.1.2 Geração e composição	6
3.1.3 Tratamento e disposição final	7
3.1.4 Instrumentos legais.....	9
3.2 Fraldas descartáveis	11
3.2.1 Histórico	11
3.2.2 Composição	13
3.2.2.1 Fraldas descartáveis convencionais	13
3.2.2.2 Fraldas não-convencionais	18
3.2.2.3 Outras aplicações para o SAP	19
3.2.2.4 Biodegradabilidade do SAP	24
3.2.3 Geração	26
3.2.4 Tratamento e destinação final.....	28
3.2.5 Processo de reciclagem mecânica	34
3.3 Lodo.....	36
3.3.1 Definição e legislação	36
3.3.2 Parâmetros importantes do lodo	37
3.3.3 Classificação e caracterização posteriores	39
3.3.4 Tratamento do lodo.....	43
3.3.4.1 Adensamento.....	43

3.3.4.2 Estabilização.....	44
3.3.4.3 Desidratação ou secagem	46
3.3.4.4 Higienização	47
3.3.4.5 Disposição final.....	48
4 METODOLOGIA.....	50
4.1 Determinação de DBO e DQO.....	50
4.2 Determinação dos sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV) e sólidos fixos (SF) do lodo e do SAP.....	50
4.3 Determinação do teor de umidade.....	54
4.4 Discussão sobre as alternativas de tratamento e de aplicações do lodo.....	54
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
5.1 Determinação DBO e DQO.....	56
5.2 Determinação ST, SV e SF.....	56
5.3 Determinação do teor de umidade.....	58
5.4 Discussão das alternativas de tratamento e de aplicações do lodo.....	59
6 CONCLUSÃO.....	64
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
ANEXO.....	76

1 INTRODUÇÃO

Todas as ações humanas geram algum tipo de resíduo. Havendo qualquer gasto de energia ou de material associado à sua realização, pode-se dizer que houve geração de resíduo. Independente da forma que tenha, desde sonoro até sólido, ele impactará o meio de alguma maneira. Este processo de geração de resíduos, de certa maneira entrópico, é inevitável, mas pode ser analisado sob um ponto de vista otimista, no qual os resíduos podem se tornar novos produtos.

Todo cidadão brasileiro produz pouco mais de 1 kg de resíduo sólido diariamente, considerando tanto o que é gerado dentro de seu lar, em suas atividades cotidianas, quanto o que é assimilado pelo serviço de limpeza pública de sua cidade. A taxa de geração de Resíduo Sólido Urbano (RSU) aumentou em 0,8% de 2014 para 2015 (ABRELPE, 2015). Este “lixo”, como é popularmente chamado, poderá trazer inúmeros problemas ambientais e de saúde humana, caso não for devidamente tratado.

Os acréscimos na produção de resíduo podem ser explicados por diferentes fenômenos que ocorrem em nossa sociedade contemporânea. Pode-se ressaltar a mudança nos hábitos de consumo da população: o rápido avanço das tecnologias gera uma pressão pelo consumo em massa. Ao mesmo tempo em que o desenvolvimento de novos produtos cada vez mais tecnológicos traz benefícios à vida moderna, ele também origina novos tipos de resíduos, cujos tratamentos adequados são, muitas vezes, desconhecidos.

Atualmente, grande parte dos produtos é fabricada sob a lógica da “descartabilidade”, ou seja, eles são feitos para que não durem muito tempo e sejam facilmente descartados pelos consumidores. A “cultura do descartável”, termo criado pelo filósofo francês Giles Slade, surgiu nos Estados Unidos em meados do século XIX quando uma “variedade de matérias-primas baratas se tornaram disponíveis para a indústria” (SLADE, 2007 *apud* GUIMARÃES,

2014). Esta novidade na indústria possibilitou que materiais, antes duradouros, fossem substituídos por materiais baratos e de pouca durabilidade, estratégia que foi adotada por inúmeras empresas, as quais expandiram suas vendas.

Um produto que teve rápidos avanços ao longo do século 20 foi a fralda descartável, destinada tanto a bebês quanto a adultos. Elas foram inventadas na Suécia na década de 1940 e sua comercialização sofreu uma forte expansão duas décadas depois, quando a Procter & Gamble introduziu a fralda descartável através da marca Pampers, a qual encontrou o mercado receptivo na América do Norte, Europa e Ásia (WANG; REZAI, 2001).

A fralda descartável teve como principal inovação tecnológica a inserção do polímero superabsorvente, o qual permite o uso de menor quantidade de material para uma maior absorção dos fluidos. Além disso, uma fralda descartável contém outros materiais diferentes, os quais têm funções como a impermeabilidade e a permeabilidade e difusão de líquidos. (WANG; REZAI, 2001)

Este avanço tecnológico representou um grande passo no desenvolvimento do produto, porém o aumento da complexidade de materiais tem implicações em sua reciclabilidade e biodegradação. Estima-se que uma fralda descartável leva 600 anos para se degradar na natureza (UNICEF *apud* LIXO, 2017). Quanto à sua reciclagem, são esparsas as iniciativas de processar o resíduo a fim de aproveitar seus materiais reutilizáveis, tais como os plásticos e a celulose que compõem o produto.

No ano de 2011, dados indicam que foram consumidas 7,7 bilhões de unidades no Brasil, país que ocupa terceiro lugar no consumo de fraldas descartáveis do mundo ano (VIDAL; HORA, s.d. e ABIPHEC, s.d.). O volume de consumo é tal que se estima que este tipo de resíduo (pós-consumo) representa quase 2% do total do peso de RSU gerado no país.

Analisando este dado de geração, é possível entender o tamanho do problema ambiental por trás do consumo de fraldas descartáveis. É necessário

considerar também, que por falta de solução técnica disponível para tal resíduo, ele é atualmente destinado a lixões e aterros sanitários.

A legislação brasileira acerca de resíduos sólidos, guiada pela Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) objetiva que a hierarquia de ações relativas aos resíduos seja a seguinte: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e, por fim, a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Tendo em vista o tamanho do problema relacionado ao aterramento de fraldas descartáveis, torna-se essencial desenvolver uma solução técnica e economicamente viável para elas, que venha como alternativa ao aterramento. Esta solução deve estar alinhada aos objetivos da Economia Circular, de manter aos produtos, componentes e materiais em seus mais altos níveis de utilidade e valor (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

Um processo de reciclagem mecânica de fraldas já está sendo desenvolvido, mas ainda encontra alguns obstáculos, que devem ser estudados e contornados. Um deles é a geração de lodo, coproduto da etapa de lavagem destas fraldas usadas. O que podemos fazer com este lodo, que possui um volume considerável frente ao material recuperado? Esta pergunta será respondida ao longo deste trabalho, que objetiva garantir maior circularidade do processo de reciclagem, ao encontrar formas de tratamento e aplicações sustentáveis para este coproduto.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O trabalho tem como objetivo geral o estudo teórico de formas de tratamento e de aplicações para o lodo gerado na etapa de limpeza do processo de reciclagem mecânica de fraldas descartáveis pós-consumo.

2.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, o trabalho terá como objetivos específicos:

- Avaliar a biodegradabilidade do lodo;
- Pesquisar alternativas de tratamento do lodo e;
- Analisar teoricamente algumas alternativas de aplicações finais para o lodo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Resíduos sólidos

3.1.1 Definições

Resíduos sólidos são definidos pela Norma Brasileira Registrada (NBR) 10.004 como (ABNT, 2004a):

Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Além desta definição, é necessário apresentar o conceito de “rejeito”, que é definido pela Organização Mundial de Saúde (OMS) como “aquilo que seu proprietário não deseja mais, em um certo lugar e em um certo momento e que não tem valor comercial corrente” (BERTOLINI *apud* CALDERONI, 1999, p. 27). Na PNRS (artigo 3º, inciso XV), define-se rejeito como (BRASIL, 2010):

Resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada.

Ao mesclar estas duas últimas definições, nota-se que há uma diferença relevante entre resíduos e rejeitos: este segundo perde seu valor comercial uma vez que não apresenta alguma possibilidade de “tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis”.

Consideremos que os resíduos que apresentam possibilidades de tratamento adequadas são passíveis de valorização, diferentemente dos rejeitos. A valorização de resíduos consiste no processo de agregar valor ao que, inicialmente, não possuía nenhuma serventia. Podem ser considerados processos de valorização de resíduos a reciclagem, a compostagem, o aproveitamento energético de aterros e o co-processamento de resíduos

industriais, entre outros (BRANDÃO, 2006). As fraldas descartáveis são, hoje, consideradas rejeito.

3.1.2 Geração e composição

A população brasileira gerou, no ano de 2015, o equivalente a 218.874 t/dia de RSU, valor que sofreu um crescimento de 1,7% em relação ao ano anterior. Considerando a população do país, isto nos dá uma média de 1,071 kg/hab/dia de resíduos sólidos urbanos (ABRELPE, 2015).

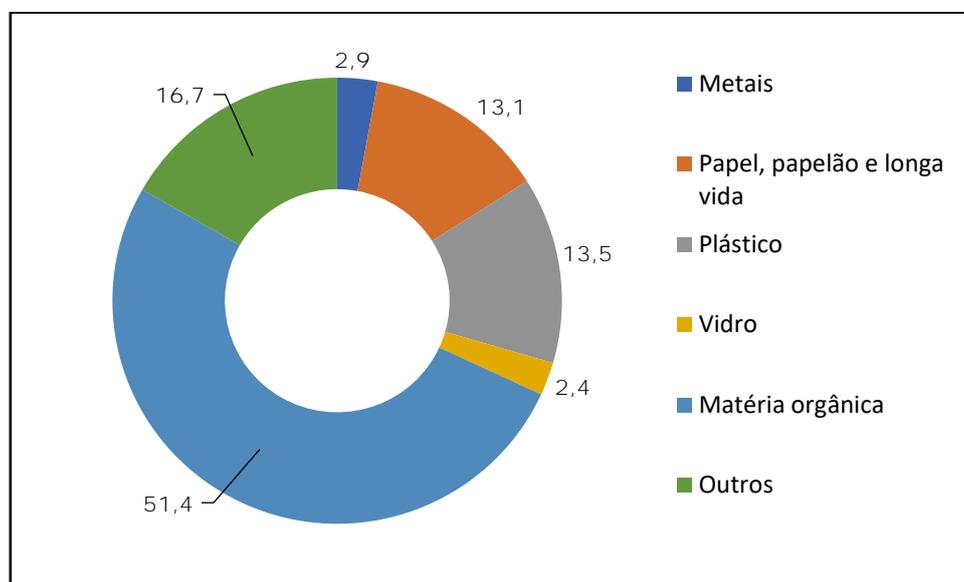
A taxa de geração de resíduos nos países europeus, pertencentes à União Europeia, é um pouco maior do que a brasileira: em 2012 foi de 1,35 kg/hab.dia (EUROSTAT, 2014 *apud* MANNARINO; FERREIRA; GANDOLLA, 2016). Já a taxa de geração per capita nos Estados Unidos é ainda maior: dados de 2013 indicam que cada cidadão gerou, em média, 1,99 kg/dia (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2013).

Além dos valores de geração de resíduos, a composição gravimétrica também sofre grande influência do grau de desenvolvimento e, conseqüentemente, de renda do país. Isso pode ser explicado, pois o estilo de vida das pessoas interfere na composição do lixo que elas geram. Em países subdesenvolvidos, de menor renda per capita, a porção orgânica do resíduo é mais expressiva, uma vez que a população destes países costuma ter o hábito de, por exemplo, cozinhar mais em casa e consumir menos produtos industrializados (KHATIB, 2011).

A composição dos resíduos gerados no Brasil, como exemplo de país em desenvolvimento, é marcada pela presença significativa de matéria orgânica, sendo esta responsável por praticamente metade do volume coletado. Os materiais “secos”, que possuem possibilidade de reciclagem, compõem aproximadamente 32% do percentual de volume coletado, conforme consta no gráfico abaixo. Já na categoria “outros”, responsável por 16,7% dos RSU, temos materiais que não se encaixam em nenhuma das demais categorias, e

são, em sua maioria, rejeitos (Gráfico 1). As fraldas descartáveis, por exemplo, enquadram-se nesta categoria de resíduo.

Gráfico 1- Composição gravimétrica dos RSU coletados no Brasil. Dados referentes ao ano de 2008.



Fonte: adaptado de IPEA, 2012 (IPEA, 2012).

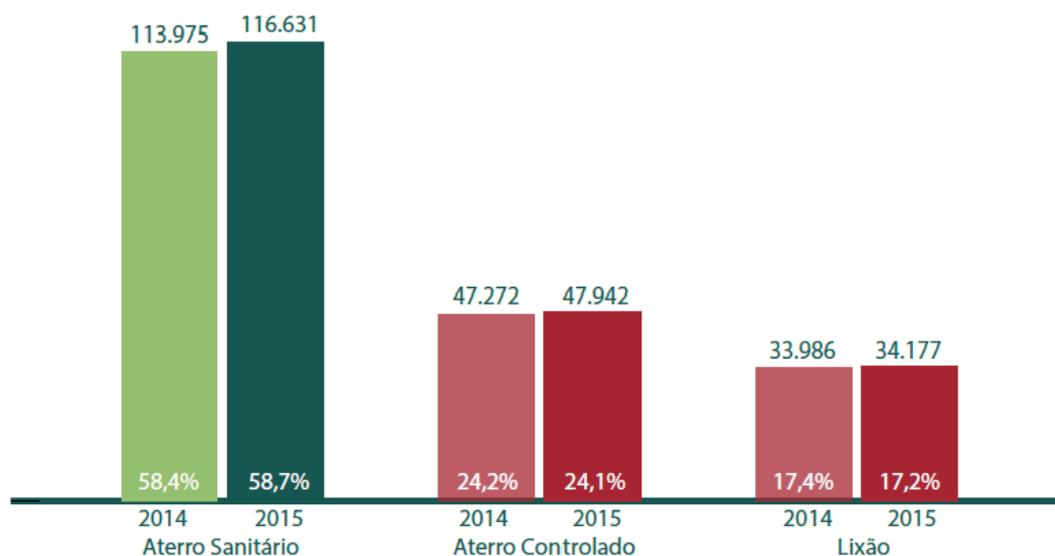
3.1.3 Tratamento e disposição final

A geração de resíduos pode resultar de duas maneiras diferentes no processo produtivo: na fase industrial, como consequência do ato de produzir, ou após o término da vida útil do produto, sendo chamado assim, de pós-consumo (SOTTORIVA, 2011). Este presente trabalho tratará de resíduos pós-consumo (fraldas descartáveis usadas), os quais representam um desafio maior ao tratamento adequado, visto que a complexidade de componentes aumenta ao longo de sua vida útil.

Uma vez que os resíduos sólidos possuem características físicas e químicas e, portanto, valores econômicos tão distintos, eles podem ser submetidos a diversas formas de coleta, tratamento e disposição final. Em seu 9º artigo, a PNRS estabelece uma ordem de prioridade na gestão e gerenciamento de resíduos: “não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos” (BRASIL, 2010).

O Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil elaborado pela ABRELPE, versão de 2015, mostra a porcentagem de RSU destinado aos três principais tipos de disposição final utilizados atualmente no Brasil: aterro sanitário, aterro controlado e lixão, conforme mostra o Gráfico 2.

Gráfico 2 - Disposição final de RSU no Brasil por tipo de destinação (t/dia).



Fonte: ABRELPE, 2015.

Os principais problemas relacionados ao aterramento de resíduos com alto conteúdo de material biodegradável, como é o brasileiro, são listados a seguir (SMITH et al., 2001):

- Emissão de gás metano, o qual contribui para o aquecimento global e implica em riscos de explosões;
- Contaminação do lençol freático com a percolação do lixiviado formado a partir da massa de resíduos;
- Problemas relacionados ao uso da terra;
- Ruídos no entorno do local e;
- Maus odores.

O cenário europeu é um tanto diferente. Como formas de tratamento e destino final dos resíduos sólidos urbanos na União Europeia, no ano de 2012, registrou-se que 27% dos resíduos foram encaminhados para reciclagem, 15% para compostagem, 24% para incineração e 34% para aterros sanitários (EUROSTAT, 2014 *apud* MANNARINO; FERREIRA; GANDOLLA, 2016).

Apesar de considerar o aterramento, em aterros sanitários, como solução ambientalmente adequada, a PNRS deixa claro que um de seus objetivos principais é a redução do envio de resíduos sólidos a estes locais. Uma de suas diretrizes é reduzir “70% dos resíduos recicláveis secos dispostos em aterros sanitários, com base na caracterização nacional em 2012”. Assim, acima da preocupação de reduzir o envio de RSU para lixões e aterros controlados, tidos como ambientalmente inadequados, é necessário implantar medidas que incentivem as práticas de reutilização e reciclagem dos materiais que compõe os RSU (BRASIL, 2011).

As vantagens da reciclagem são levantadas no Manual de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2001):

- Preservação de recursos naturais;
- Economia de energia nos processos produtivos;
- Aumento da vida útil dos aterros sanitários;
- Estímulo à conscientização ambiental e à cidadania;
- Geração de empregos e renda;
- Redução da quantidade de resíduos dispostos em aterros sanitários e;
- Economia de transporte, pela redução da quantidade de material destinado a aterros.

3.1.4 Instrumentos legais

A temática de resíduos sólidos no Brasil ainda é jovem se comparada às preocupações e soluções que existem em países desenvolvidos. O problema se agrava com o aumento populacional, somado aos incrementos nas taxas de geração de resíduos que existem na medida em que a sociedade brasileira se desenvolve, com o avanço da industrialização. Além da questão da geração de resíduos, o país se confronta com os desafios de adequar, tanto a coleta dos resíduos quanto seu tratamento, às necessidades ambientais, sociais e econômicas específicos de cada região.

Em contrapartida, a legislação existente apresenta avanços no tema e fundamenta-se na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Tal política evoluiu de um Projeto de Lei do Senado Federal (nº 354/89), que dispunha sobre o acondicionamento, a coleta, o tratamento, o transporte e a destinação

final dos resíduos de serviços de saúde e, somente em 1991, foi instituída pelo Congresso Nacional. Por fim, em agosto de 2010, a Presidência da República sancionou a Lei 12.305 que estabelece, em nível nacional, a PNRS a partir das diretrizes para a criação do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, e que foi regulamentada a partir do Decreto nº 7.404, em dezembro de 2010 (TORRES; BORGER, 2014).

Tal Plano é um instrumento da PNRS e é elaborado pela União, sob a coordenação do Ministério do Meio Ambiente, e cuja vigência por prazo indeterminado e horizonte é de 20 anos, com atualizações a cada quatro anos. O conteúdo mínimo a ser apresentado no Plano consiste, basicamente, de um diagnóstico atualizado da situação de resíduos sólidos no país, uma proposição de cenários, metas que expressem alguns dos objetivos da PNRS, diretrizes, normas e medidas a serem tomadas com a finalidade de cumprir com as metas traçadas e, por fim, os meios de fiscalização a serem utilizados (BRASIL, 2010).

De acordo com o artigo 4º da Lei 12.305/2010, a PNRS “reúne o conjunto de princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações adotados pelo Governo Federal, isoladamente ou em regime de cooperação com Estados, Distrito Federal, Municípios ou particulares, com vistas à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos”. Dentre os objetivos desta Política, expressos no artigo 7º, percebe-se que a prática da reciclagem é incentivada nos seguintes incisos (BRASIL, 2010):

II – não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos [...];

VI – incentivo à indústria da reciclagem, tendo em vista fomentar o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados.

Um importante instrumento tratado no 3º artigo da PNRS é a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos. A partir dele, diversos agentes envolvidos na vida e pós-vida dos produtos são engajados, sendo eles fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, dos consumidores e dos titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo dos

resíduos sólidos. O objetivo principal deste instrumento é minimizar o volume de geração de resíduos sólidos e rejeitos, através da atribuição de responsabilidades para com o ciclo de vida dos produtos a todos os agentes envolvidos (BRASIL, 2010).

Um exemplo prático de bom uso desta ferramenta seria o desenvolvimento de processos de reciclagem de produtos, que chegam ao fim de sua vida útil, partindo dos próprios fabricantes. Uma ação como esta compreende conceitos presentes na Política, pois visa reduzir o volume de resíduo destinado a aterros sanitários, dando um destino mais adequado para o resíduo.

Outro instrumento crucial para a PNRS chama-se ‘poluidor-pagador’, baseado em um dos princípios do direito ambiental de mesmo nome. Este princípio estabelece a obrigatoriedade de que aquele que utilizar um recurso ambiental, ou causar algum prejuízo ao meio ambiente, deve suportar os custos associados a ele. A responsabilização do poluidor pelo prejuízo causado por ele deve se dar sob duas diferentes formas de pagamento: em prestação de dinheiro ou em atos do poluidor, de forma a compensar pelo prejuízo causado (LEITE, 2009).

3.2 Fraldas descartáveis

3.2.1 Histórico

As fraldas infantis são desenhadas com a finalidade de absorver e conter a urina e as fezes de bebês e crianças pequenas. Seu design é pensado para manter a pele seca, assim como para evitar vazamentos externos. Em especial, as fraldas infantis têm como principal requisito a efetividade em receber, absorver e reter os excrementos durante os primeiros dois ou três anos da vida de um bebê (EDANA, 2005).

A evolução das fraldas infantis apresentou rápidas mudanças ao longo dos anos. Inicialmente, elas eram laváveis e reutilizáveis, comumente feitas a partir

de toalhas de algodão ou panos de musselina (livre tradução). Foi somente na década de 1940 que surgiram as primeiras fraldas descartáveis, feitas basicamente de papel (EDANA, 2005). Vide Quadro 1.

Com o desenvolvimento da indústria do plástico, este material passou a ser inserido da composição das fraldas descartáveis, cumprindo a função de impermeabilizar o fundo da fralda e evitar vazamentos. O principal marco no desenvolvimento das fraldas descartáveis, no entanto, foi o uso dos polímeros superabsorventes (SAP, do inglês *superabsorbent polymer*), material que permitiu uma melhoria drástica no desempenho das fraldas, tornando-se indispensável à sua composição. (WANG; REZAI, 2001).

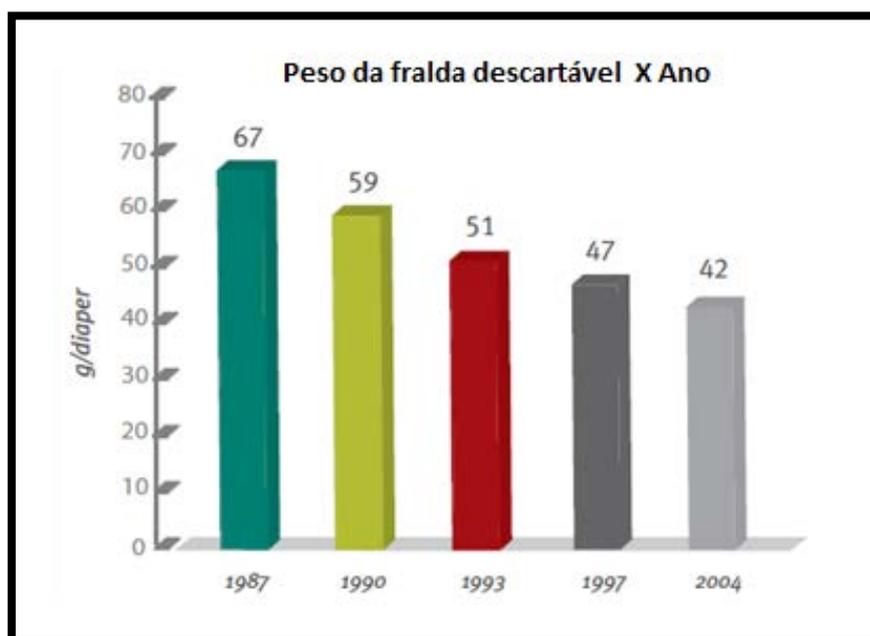
Quadro 1 - Principais marcos na história da evolução das fraldas.

ANO	DESENVOLVIMENTO
1887	Primeira produção em massa de fraldas reutilizáveis de pano (industrialização das fraldas reutilizáveis de pano)
1942	Surgimento das primeiras fraldas descartáveis, na Suécia, feitas com papel
1961	Surgimento de marca americana, que contribuiu para a disseminação em massa da fralda descartável em todo o mundo
1982	Marca japonesa lança primeiro modelo de fralda descartável utilizando polímero superabsorvente em sua composição

Fonte: Elaborada a partir de Disposable Diapers (WANG; REZAI, 2001; RICHER, s.d.).

A inserção deste polímero na composição das fraldas descartáveis permitiu uma redução significativa do peso unitário da fralda, conforme mostra o Gráfico 4, fator que diminui o impacto ambiental relacionado ao volume de geração das fraldas descartadas. Este material veio para substituir, principalmente, a polpa de celulose (*fluff pulp*). Entre os anos de 1987 e 2005, a parcela de SAP aumentou de 1% para 32% no peso total da fralda (CORDELLA et al., 2015).

Gráfico 3 - Redução do peso médio da fralda descartável entre 1987 e 2004.



Fonte: EDANA, 2005.

Em contrapartida à redução de impacto ambiental inerente à diminuição do peso da fralda descartável, outros impactos são gerados. A origem dos materiais utilizados nas fraldas atuais, por exemplo, confere maior impacto ambiental uma vez que tanto os plásticos quanto o polímero superabsorvente são provenientes da indústria petrolífera, contribuindo para o consumo de matérias-primas não renováveis. Outro fator relevante que deve ser considerado é o aumento da complexidade de composição das fraldas descartáveis, que implica na necessidade de desenvolver novas tecnologias para a recuperação ou reciclagem do produto. Cria-se um produto novo, sem desenvolvimento prévio de soluções para destiná-lo de modo ambientalmente correto.

3.2.2 Composição

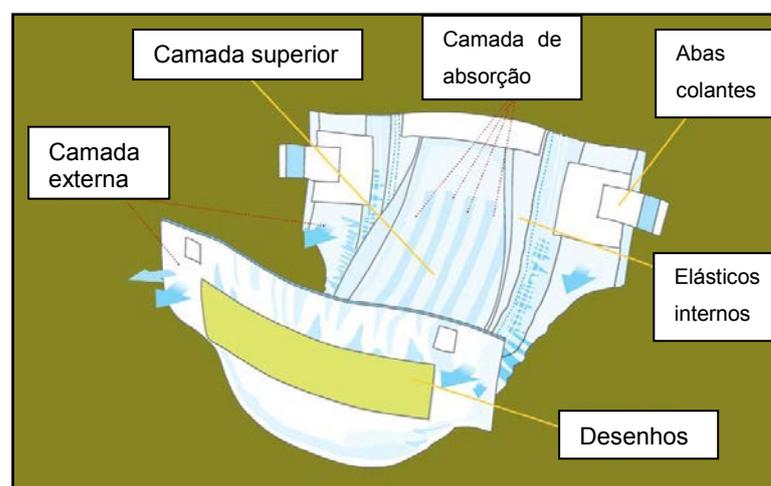
3.2.2.1 Fraldas descartáveis convencionais

As fraldas descartáveis são estruturadas em camadas de diferentes materiais, que permitem a distribuição e a contenção da urina e das fezes em seu interior.

Elas possuem quatro partes principais (EDANA, 2005; CORDELLA et al., 2015):

1. Camada superior, a qual estará em contato direto com a pele do bebê e precisa, portanto, ser macia ao toque. Esta camada deve deixar os líquidos passarem com facilidade e, em geral, é feita com um tecido não-tecido (TNT) de polipropileno (PP);
2. Camada de distribuição dos dejetos, cuja função é armazenar brevemente os dejetos antes que sejam absorvidos pela camada seguinte. Materiais tipicamente utilizados para este fim são a polpa de celulose e/ou o polímero superabsorvente;
3. Camada de absorção, o principal componente da fralda, uma vez irá reter todo o excremento produzido pelo bebê. Atualmente é composta pela polpa de celulose e o polímero superabsorvente e;
4. Parte externa, cuja função principal é prevenir vazamentos. Esta camada, juntamente da camada superior, é responsável por dar sustentação à fralda e, portanto, deve ser suficientemente reforçada, mantendo uma baixa espessura. É comumente composta por filmes de polietileno de baixa densidade (PEBD), ou por compósitos de PEBD e tecido não-tecido. Costuma apresentar microporos, de modo a garantir a troca de gases com o exterior, mantendo a pele seca.

Figura 1 - Desenho esquemático de uma fralda descartável, com seus principais elementos.

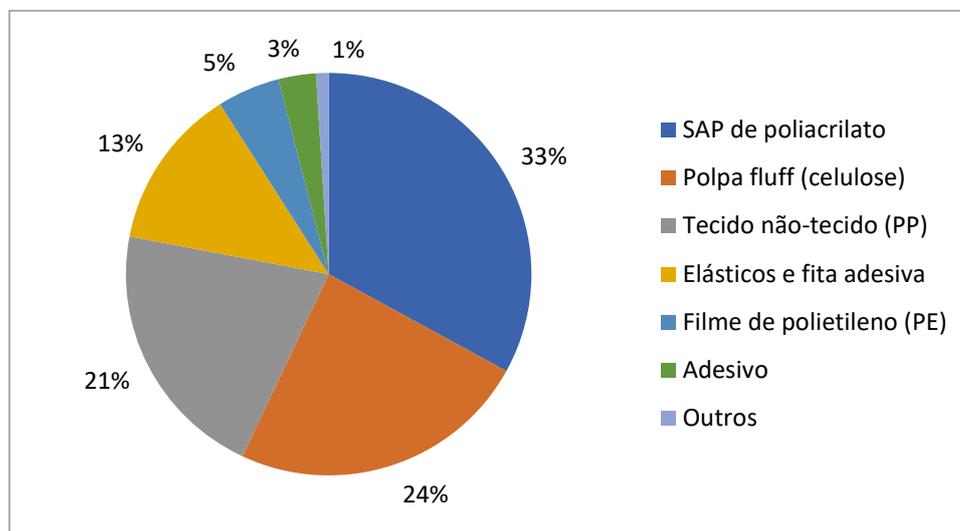


Fonte: Adaptado de EDANA (EDANA, 2005).

Além destes materiais, é comum encontrar tintas e corantes, assim como fitas e elásticos em sua composição (Figura 1) (CORDELLA et al., 2015). A

distribuição dos materiais de uma fralda descartável comum pode ser vista no Gráfico 5 (EDANA, 2015).

Gráfico 4 - Composição, por contribuição de cada material por peso, de uma fralda descartável comum, no ano de 2013.



Fonte: Adaptado de EDANA (EDANA, 2015).

Podem-se considerar, então, quatro principais materiais que compõe a fralda descartável padrão nos dias atuais: os plásticos polietileno e polipropileno, a polpa de celulose e o polímero superabsorvente (SAP).

O polietileno (PE) é um termoplástico muito utilizado na indústria. Ele é um polímero parcialmente cristalino e flexível, mais comumente utilizado em suas duas formas: polietileno de alta densidade (PEAD) ou polietileno de baixa densidade (PEBD), ou em blendas destes dois polímeros. Este polímero é utilizado em embalagens, filmes, caixas d'água, brinquedos, etc (PIATTI; RODRIGUES, 2005). Seu uso foi tão intensificado nas últimas décadas, que se estima que o mercado brasileiro de PE cresça em um ritmo duas vezes superior ao do Produto Interno Bruto (PIB) do país (COUTINHO; MELLO; SANTA MARIA, 2003). No caso da fralda, encontra-se como um filme de pouca espessura, feito a partir do PEBD.

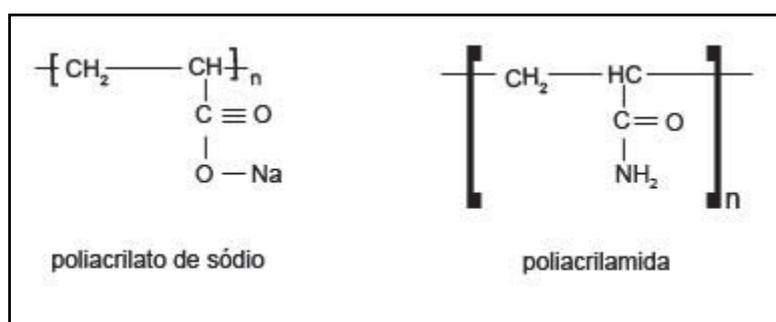
O polipropileno (PP) também é um termoplástico largamente utilizado no mercado atual, de estrutura semi-cristalina. Apresenta propriedades como

excepcional resistência a rupturas, boa resistência a impactos e boa resistência química. É utilizado, principalmente, na fabricação de embalagens e recipientes e na indústria automobilística (PIATTI; RODRIGUES, 2005).

A celulose é o polímero natural mais abundante na natureza, pois é encontrado em plantas e fibras naturais, como o algodão (SANINNO; DEMITRI; MADAGHIELE, 2009). A polpa de celulose, também conhecida como celulose *fluff*, possui características absorventes e, por isso, é utilizada em fraldas descartáveis e demais produtos absorventes. Este tipo de celulose é quase totalmente produzido a partir da celulose BSKP (*bleached softwood kraft pulp*, ou celulose *kraft* branqueada de fibra longa). Apesar de a presença de celulose *fluff* ter sido reduzida significativamente, após introdução do polímero superabsorvente, este material é essencial ao bom funcionamento da fralda, pois suas fibras promovem uma tensão superficial, o que aumenta a retenção e absorção dos líquidos. Outro benefício de seu uso é que a redução de problemas cutâneos, decorrentes do contato direto da pele com o polímero (VIDAL; HORA, s.d.).

Por fim, há o polímero superabsorvente. Dentre os diferentes tipos de polímeros como este, destacam-se a poliacrilamida (PA) e o poliacrilato de sódio (PAS), cujas estruturas monoméricas estão representadas na Figura 2. Ambos são polímeros sintéticos, comumente encontrados na forma granular, e são hidrofílicos, ou seja, que possuem afinidade com a água e, assim, conseguem absorver água sem serem dissolvidos, como mostra a Figura 3.

Figura 2 - Estruturas dos monômeros de poliacrilato de sódio e de poliacrilamida, respectivamente.



Fonte: Sandonato, 2011.

Vale ressaltar que um SAP pode absorver uma massa de água equivalente a até 1000 vezes o seu peso inicial (HORIE et al. *apud* CORDELLA et al., 2015). Esta propriedade é 'promovida' pelos *crosslinks* químicos ou físicos existentes nas cadeias da macromolécula, os quais permitem a absorção tridimensional de água (WANG; REZAI, 2001). A rede polimérica formada a partir destes *crosslinks* incha, pela absorção de moléculas de água, pela força osmótica sobre elas exercida (WANG; REZAI, 2001). O resultado desta interação entre a água e o polímero superabsorvente é o hidrogel, que é uma solução em equilíbrio no estado semi-sólido (SANINNO; DEMITRI; MADAGHIELE, 2009).

Figura 3 - SAP seco, em grão, e SAP hidratado com água destilada, respectivamente.



Fonte: Sandonato, 2011.

O uso de polímeros superabsorventes em fraldas descartáveis apresenta algumas vantagens destacadas a seguir (SANINNO; DEMITRI; MADAGHIELE, 2009; WANG; REZAI, 2001):

- Ausência de vazamentos;
- Não gera aquecimento;
- Redução nas contaminações fecais em locais como escolas e creches e consequente redução da disseminação de doenças;
- Aumento do conforto do usuário;
- Melhoria no controle da umidade e do pH cutâneos;
- Prevenção de irritações cutâneas pelo contato com direto com a fralda e;
- Redução no volume e peso finais da fralda.

Em seu consumo, são adicionados à fralda descartável elementos orgânicos como a urina e as fezes, sendo que o maior volume é da urina (94%) em relação às fezes (apenas 6%). Somando-os à polpa de celulose, pode-se dizer que ela é composta principalmente por matéria orgânica. Como é de se esperar, o peso final de uma fralda pós-consumo é significativamente superior ao de uma fralda pré-consumo, sendo que um estudo experimental realizado na Espanha, em 2008, estimou um peso médio de 212 gramas por fralda descartável usada (COLÓN et al., 2013).

Com os excrementos fecais vêm algumas espécies de bactérias que compõem a flora intestinal dos bebês e crianças. Nos primeiros dias de vida, é mais comum encontrar as espécies bacterianas conhecidas como *E. coli* e estreptococos, cujas populações crescem rapidamente (SCHWIERTZ et al., 2003). Fatores externos, como o contato próximo da mãe, permitem que o trato gastrointestinal dos bebês se torne um habitat propício para o crescimento de uma microbiota complexa e densa, composta por diferentes espécies, principalmente anaeróbias, tais como as enterobactérias, bifidobactérias, enterococos, etc (FANARO et al., 2003). A flora intestinal humana apresenta muitas variações, de acordo com alimentação e padrões sanitários do local. É necessário ressaltar que várias destas espécies bacterianas oferecem riscos de contaminação biológica e podem causar doenças, caso haja contato oral, por exemplo.

3.2.2.2 Fraldas não-convencionais

Como alternativas às fraldas descartáveis convencionais, existem algumas opções que compartilham o objetivo de reduzir o impacto ambiental relacionado à sua destinação final:

- Fraldas reutilizáveis: se baseiam no mesmo conceito das fraldas de pano laváveis utilizadas antigamente. Reduzem o uso de matérias-primas, uma vez que podem ser reutilizadas inúmeras vezes. Por outro lado, requer gasto de água e sabão para manter a higiene e bom uso do produto.

- Fraldas compostáveis: são feitas a partir de materiais biodegradáveis e podem, portanto, ser tratadas pelo processo de compostagem junto da fração orgânica dos RSU. Nelas, os plásticos PP e PE são substituídos pelo PLA (ácido polilático), de origem vegetal, e o SAP pode ser substituído por biopolímeros feitos a partir de amido (COLÓN et al., 2013). Produzidas a partir de matérias-primas renováveis, possuem impacto ambiental menor do que as fraldas convencionais. Por outro lado, seu uso não reduz o volume de geração de resíduo uma vez que elas têm o mesmo peso que uma fralda descartável.
- Fraldas “modulares”: contém uma parte externa reutilizável, de algodão, e a absorção é feita por sachês de fibras de celulose, “pasta *fluff*” e um componente superabsorvente. Estes sachês não são reutilizáveis, mas podem ser compostados ou descartados no vaso sanitário, reduzindo o volume de resíduo gerado (GDIAPERS, 2017).

3.2.2.3 Outras aplicações para o SAP

Além do uso em produtos higiênicos absorventes, hoje considerados essenciais para as fraldas descartáveis, os polímeros superabsorventes possuem outras aplicações no campo da medicina e de higiene pessoal, principalmente os degradáveis, feitos a partir de celulose. São exemplos destas aplicações: para remoção do excesso de água do corpo, no tratamento de algumas doenças; nos comprimidos, para liberação controlada de medicamento; no auxílio da regeneração de tecidos; em revestimento de feridas; em medicamentos para obesidade, como redutores de apetite; no revestimento de materiais cirúrgicos e; na fabricação de lentes de contato flexíveis (SANINNO; DEMITRI; MADAGHIELE, 2009; ROSA; BORDADO; CASQUILHO, 2007).

Além destas aplicações mencionadas, o polímero superabsorvente pode ser usado em diferentes áreas, as quais serão discutidas a seguir:

- **USO AGRÍCOLA**

É crescente o interesse de utilizar o hidrogel na agricultura, por sua característica de absorção e retenção de água e nutrientes, mesmo sob compressão. Ao inchar-se com água, o hidrogel possui a capacidade de liberar

espaçadamente partículas de água através de um mecanismo de difusão, uma vez que exista um gradiente de umidade ao seu redor. Portanto, ele é utilizado com intuito de permitir o cultivo vegetal em ambientes áridos e desérticos, onde a disponibilidade hídrica é escassa. Os grãos de polímero superabsorvente são misturados ao solo, próximos às raízes da planta, e após a irrigação do cultivo, a água e os nutrientes são absorvidos pelos grãos, os quais incham e, lentamente, liberam esta solução para as plantas, aumentando o tempo em que o solo se encontra úmido (SANINNO; DEMITRI; MADAGHIELE, 2009).

Apesar de não serem biodegradáveis, os polímeros superabsorventes mais comumente utilizados nos produtos higiênicos absorventes, os sintéticos (tanto feito a partir de poliacrilamida quanto poliacrilato de sódio), são utilizados na agricultura como auxílio para a escassez hídrica. Alternativo a eles, estão os polímeros superabsorventes feitos a partir de celulose, sendo assim, biodegradáveis. Estes, sim, podem ser utilizados no solo sem prejuízo neste tema (SANINNO; DEMITRI; MADAGHIELE, 2009).

O uso de SAP na agricultura e nos habitats florestais encontra as seguintes potencialidades (ROSA; BORDADO; CASQUILHO, 2007):

- Melhoria das condições ecossistêmicas em terrenos desertificados ou em vias de desertificação, servindo como suporte da vida nestas zonas;
- Recuperação de solos por florestação e consequente atenuação do impacto da seca;
- Incremento da retenção da água superficial em solos aráveis, proporcionando melhores condições de germinação às culturas.

Outras aplicações que o SAP tem na agricultura são: uso em fertilizantes, visando o controle de sua dispersão no solo (LIANG et al., 2007; RASHIDZAHED; OLAD, 2014 *apud* GOMEZ, 2015); como materiais de recobrimento de sementes e raízes (ABD EL-REHIM et al., 2004 *apud* GOMEZ, 2015) e como estabilizadores de solo, visando a redução da erosão (HAN et al., 2007 *apud* GOMEZ, 2015).

Gomez (2015) realizou um levantamento de dados sobre o uso de SAP na agricultura. Uma das vantagens que o uso deste polímero oferece é o uso mais

eficiente dos nutrientes, presentes no solo ou oriundos de fertilizantes, tanto em condições hídricas normais, quanto sob stress hídrico. O polímero estudado foi o poliácrlato de potássio, e ele corrigiu o solo de tal modo que aumentou a produtividade de uma lavoura de tomates, apresentando benefícios à agricultura.

Quanto aos efeitos que o uso deste polímero tem sobre a microbiota do solo, há poucos estudos sobre este tema. Um deles afirma que o uso de poliácrlatos no solo não tem nenhum impacto negativo na microbiota encontrada no solo de algumas florestas (Basanta et al., 2002, *apud* GOMEZ, 2015). Outro estudo afirma que seu uso pode até impactar positivamente as populações destas espécies de microorganismos (Lee et al., 2008 *apud* GOMEZ, 2015).

Por outro lado, Frantz et al. (2005, *apud* GOMEZ, 2015) sugere que o benefício do uso de SAP na agricultura só ocorre nos primeiros estágios da vida da planta, decaindo, ou até deixando de existir quando a planta atinge estágios mais avançados em seu cultivo. Alguns estudos sugerem causas para a perda de eficiência do polímero: alterações da pressão sobre o polímero, quando é aplicado em profundidades maiores do solo (ZOHURIAAN-MEHR et al., 2008, *apud* GOMEZ, 2015); oscilações na umidade, por causa de ciclos de umedecimento e secagem no ambiente (BAI et al., 2013; BANEDJSCHAFIE; DURNER, 2015, *apud* GOMEZ, 2015) e; presença de sais dissolvidos (KANZANSKII; DUBROVSKII, 1992 *apud* GOMEZ, 2015).

- **RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS**

Estudo conduzido em Portugal analisou a recuperação do solo de uma mina de pirita, com revegetação pela espécie *Spergularia purpúrea* e aplicação de polímeros superabsorventes (poliácrlatos) utilizados em fraldas. Foi comparada a cobertura de solo pela espécie vegetal após adição de diferentes “condicionadores de solo”: poliácrlato puro, polímero removido de fraldas descartáveis e fraldas descartáveis usadas e trituradas. Concluiu-se que o solo alterado pela adição de polímero oriundo da fralda foi o que apresentou melhor recuperação, com maior crescimento vegetal. Depois dele, o tratamento que apresentou bons resultados foi com poliácrlato puro, nos levando à conclusão

de que o uso de polímeros superabsorventes na restauração de solos degradados é benéfico, por inúmeros motivos, sendo dois deles a melhora do pH do solo e a intensificação das atividades enzimáticas hidrolíticas (QU; VARENNES, 2010).

Em termos gerais, o estudo concluiu que a aplicação de polímeros hidrofílicos presentes em fraldas descartáveis, para auxiliar na estabilização vegetal em um solo degradado por mineração, de fato melhora a fitoestabilização no local. Ainda diz que os polímeros adicionados ao solo não correm muito risco de infiltrarem no solo, não ganhando muita profundidade com o passar do tempo. Por outro lado, o estudo sugere que mais pesquisas sejam feitas para tratar as fraldas usadas e, assim, reduzir a toxicidade devido à presença de microorganismos (QU; VARENNES, 2010).

Varenes, Goss e Mourato (2006) estudaram o uso do polímero superabsorvente (poliacrilato) na remediação de solo arenoso contaminado com metais (Cd, Ni e Zn). Concluíram que o uso deste tipo de polímero representa um método eficaz e econômico de tratar solos contaminados com diversos tipos de metais, uma vez que sua aplicação levou à redução significativa dos níveis de metais na planta. A planta utilizada no experimento (conhecida como azevém) teve aumento no crescimento, causado pela característica de retenção de água e nutrientes do polímero.

Gomez (2015) estudou os efeitos da aplicação de SAP nas propriedades químicas e físicas do solo, através de revisão bibliográfica e concluiu que há redução da condutividade hidráulica do solo (solos arenosos, por exemplo, perdem menos água por percolação ou evapotranspiração) e, portanto, aumento capacidade de retenção de água do solo. Azzam (1985, apud GOMEZ, 2015) afirma que os polímeros superabsorventes agem como “condicionadores” de solo, fornecendo a solos pobres e arenosos, propriedades típicas de solos saudáveis.

- **COMPOSTAGEM**

O SAP, presente no lodo estudado, pode supor uma deficiência na biodegradação. Stegmann et al (1993) estudaram o comportamento deste tipo de polímero sob condições de aterramento e compostagem, e concluíram que a presença do SAP não afetou os parâmetros de produção de lixiviado e gás, mas que sua degradação ocorre de maneira mais lenta. Sob condições aeróbicas, de simulação da compostagem, a taxa de degradação foi de aproximadamente 6%. Cordella et al (2015) apontam para o maior tempo de degradação dos polímeros superabsorventes, juntamente com a difícil separação do material com os resíduos orgânicos, como aspectos que dificultam a compostagem de resíduos com este material.

- **CODIGESTÃO ANAERÓBIA**

Um estudo conduzido na França, baseado em um processo patenteado de separação dos componentes principais da fralda descartável (plásticos, SAP, celulose e excrementos), analisou a possibilidade de co-digestão com lodo ativado da fração orgânica oriunda deste processo. O estudo partiu da hipótese de que a co-digestão com recuperação energética deste material seria uma alternativa interessante frente ao tratamento anaeróbio, pois produziria mais gás metano. Foi concluído que uma tonelada de fraldas descartáveis (50% de fraldas infantis e 50% de fraldas adultas) gerou 150kg de material orgânico seco, o que é digerido e transformado em 40m³ de metano, sob condições anaeróbicas. Este volume de gás gera um total de 400 kWh de energia, transformados em 130 kWh de energia elétrica (TORRIJOS et al., 2014).

O lodo considerado neste estudo mencionado acima difere do lodo a ser estudado neste trabalho, uma vez que não tem o SAP em sua composição, material que é retirado do efluente via reticulação e decantação, a partir da adição de um agente químico na água utilizada, e posterior agitação em tanque de decantação. Além disso, as fezes e a urina são majoritariamente removidas do lodo com a água, a qual pode ser tratada em sistema de tratamento de esgoto comum. Assim, o lodo consiste basicamente de celulose, e apresenta

porcentagem de sólidos totais (ST) de aproximadamente 10% (TORRIJOS et al., 2014).

- **USO INDUSTRIAL**

Os polímeros superabsorventes podem ser agregados à massa de concreto, com objetivo de mitigação de problemas tais como a retração autógena e aparecimento de rachaduras no concreto. Além disso, este tipo de polímero, quando adicionado ao concreto em até 0,6% em massa, tem a capacidade de aumentar a resistência a mudanças de temperatura causadas, por exemplo, pelo congelamento e degelo do concreto, sendo assim aplicação interessante para países de clima temperado (MIGNON et al., 2017).

Ainda dentro do ramo da construção civil, o SAP também encontra aplicações para o cimento, a argamassa e a cerâmica. Nestes casos, o objetivo de adicionar o polímero aos materiais é melhorar suas propriedades, através da diminuição do estresse hídrico ou aumento da porosidade, por exemplo. Outro uso do SAP na construção civil é como componente de selagem, em gaxetas de tubulações, por exemplo (SANTOS, 2015).

3.2.2.4 Biodegradabilidade do SAP

Biodegradação é o termo utilizado para o processo que ocorre quando determinado material é utilizado como nutriente por um conjunto de microorganismos (bactérias, fungos e/ou algas) presente no ambiente onde ele será depositado. Para que ele ocorra, a colônia de microorganismos deve produzir enzimas adequadas para quebrar alguma das ligações químicas da cadeia principal do polímero a ser degradado. Além disso, são necessárias condições apropriadas de temperatura, umidade, pH e disponibilidade de oxigênio no ambiente (SMITH, 2005). Se a colônia de microorganismos crescer rapidamente, o material será mais rapidamente biodegradado, sendo assim, favorável à sua disposição em ambientes naturais.

A meia-vida do SAP é estimada entre cinco e sete anos, e os produtos desta reação são o amônio (NH_4^+), o dióxido de carbono (CO_2) e a água (H_2O) (DHODAPKAR; BORDE; NANDY, 2009).

Um estudo referente à biodegradação do poliacrilato de sódio (PAS) utilizou a espécie de fungo *Phanerochaete chrysosporium*, comumente encontrada no solo e com grande potencial biodegradativo de macromoléculas, tal como a lignina. A hipótese deste estudo era de que o PAS seria mais rapidamente biodegradado com inóculo de fungo, o que não ocorreu como esperado, uma vez que esta adição de inóculo não favoreceu a degradação do material. Além disso, foi estudada a relação entre degradação do PAS na forma de pó e em sua forma reticulada, como gel, e foi concluído que o polímero como pó apresenta melhor degradabilidade (PEREIRA et al., 2008).

Outro estudo utilizou a mesma espécie de fungo, a qual, sinergicamente à microbiota do solo, foi capaz de degradar o polímero superabsorvente. Assim, o SAP se mostrou não ser um material recalcitrante, uma vez que foi degradado sob condições facilmente encontradas na natureza. Estes resultados são positivos quando se considera o uso deste tipo de polímero como condicionador de solos áridos, considerando que não é desejável que o polímero altere o solo de modo permanente (STAHL et al., 2000).

Por outro lado, Sandonato (2011) estudou a biodegradabilidade do poliacrilato de sódio (PAS) a partir da adição com a espécie de fungo *Aspergillus niger*, também comum no solo. O resultado foi positivo, uma vez que o crescimento do fungo sobre o polímero indicou que ele tem potencial para ser biodegradado. Além desta espécie de fungo, alguns tipos de bactérias também são capazes de degradar a cadeia linear de carbono de poliacrilatos, como concluiu Kawai et al (1994). O mecanismo de degradação que este grupo de bactérias exerce é similar ao da degradação de ácidos graxos.

O hidrogel formado pelo SAP, apesar de apresentar potencial de ser biodegradado por algumas espécies de bactérias e fungos como mencionado anteriormente, não pode ser considerado um material totalmente

biodegradável. Considerando duas destinações finais comuns a uma fralda descartável como sendo o aterramento e a compostagem, em nenhum destes meios o polímero superabsorvente é degradado com facilidade pelos microrganismos presentes. Este comportamento é, de certa forma, esperado de um polímero sintético e, por outro lado, atrapalha a degradação dos resíduos. Por isso, é necessário encontrar alternativas a estas destinações mencionadas acima (STEGMANN et al., 1993). Como alternativa a este problema, há os hidrogéis feitos a partir de celulose, os quais são totalmente biodegradáveis (SANINNO; DEMITRI; MADAGHIELE, 2009).

3.2.3 Geração

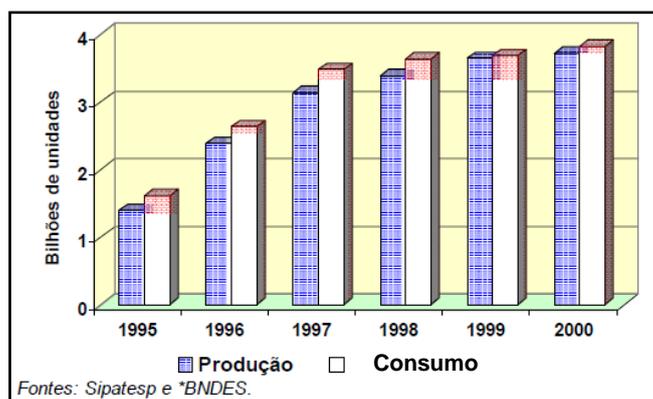
Apesar dos períodos de crise econômica ao redor do mundo, o mercado de fraldas descartáveis apresenta significativo crescimento. Os modelos de mais sucesso oferecem conforto e praticidade, reduzem a transpiração do bebê por seu tamanho reduzido e ainda requerem menos espaço de armazenamento, devido à redução de sua espessura (WANG; REZAI, 2001).

O desenvolvimento das tecnologias utilizadas na produção e a melhoria da funcionalidade das fraldas desenvolvidas auxiliaram na sua consolidação no mercado. Dados sobre a produção europeia (União Europeia e Turquia) mostram crescimento de mais de 20% em 12 anos: em 1997 foram produzidas 18 bilhões de unidades, enquanto em 2009, este número passou para 22 bilhões, representando um valor mercado de 5 bilhões de euros (EDANA, 2011 *apud* CORDELLA et al., 2015). O consumo deste produto é tão elevado que a parcela referente às fraldas descartáveis nos resíduos sólidos urbanos do continente chega a 2% do total gerado (EDANA, 2008).

O Brasil é o terceiro maior consumidor de fraldas descartáveis do mundo, ficando atrás dos Estados Unidos e da China. O consumo no ano de 2011 foi levantado em 7,7 bilhões de unidades por ano (VIDAL; HORA, s.d. e ABIPHEC, s.d.). A taxa de penetração de fraldas descartáveis no mercado brasileiro é de 57%, ou seja, pouco mais que uma a cada duas crianças brasileiras, em idade

comum de usar fraldas, faz uso deste produto (TISSUE, [2016?]). Isto indica que o volume de consumo de fraldas descartáveis ainda tem possibilidade de crescimento no Brasil.

Gráfico 5 - Produção e consumo de fraldas descartáveis no Brasil, ao longo da década de 1990.



Fonte: Valença, 2002.

Estima-se que uma criança troca de fraldas 4,4 vezes por dia (POCOCK, 2005). Assim, uma criança utiliza entre 3.600 e 4.250 unidades de fraldas na sua infância, considerando um período de aproximadamente 30 meses, que vai desde seu nascimento até o momento em que aprende a usar o banheiro sozinha (EDANA, 2005). Utilizando os dados levantados acima, e a população de crianças brasileiras nesta faixa etária, estima-se que todo mês são geradas 115.550 toneladas de fraldas descartáveis sujas no Brasil (IBGE, 2010). Isto equivale a quase 2% de todo o RSU gerado no país, índice similar ao europeu. Vide tabela 1. Este número, também em peso, chega a 2,8% na Alemanha (STEGMANN et al., 1993).

Tabela 1 - Estimativa da parcela referente às fraldas descartáveis no RSU gerado no Brasil.

Parâmetro	Valor	Unidade
População brasileira entre 0 e 3 anos de idade (dado de 2010)	8.135.110	hab
Taxa de penetração no mercado	57	%
Potenciais usuários de fraldas	4.637.013	hab

Número médio de fraldas utilizadas por dia	4,4	ud/d
Consumo brasileiro mensal de fraldas descartáveis	612.085.676	ud/mês
Peso médio de uma fralda descartável usada	0,212	kg
Peso de geração mensal de fraldas descartáveis (Brasil)	129.762	ton/mês
Peso de geração mensal de RSU (Brasil)	6.566.220	ton/mês
% de fraldas descartáveis do total de RSU	1,98	%

Fonte: Autora, elaborada a partir de dados de IBGE (2010), Pocock (2005), Tissue ([2016?]), Colón et al. (2013) e ABRELPE (2015).

Tal elevado consumo de fraldas descartáveis, combinado com o aumento populacional global, traz preocupações do ponto de vista ambiental. Quando comparado às fraldas reutilizáveis, o uso de fraldas descartáveis apresenta maiores impactos ambientais, uma vez que é responsável por gerar mais resíduos sólidos e poluentes potencialmente tóxicos e por consumir maiores quantidades de energia e de recursos naturais (LEHRBURGER; MULLEN; JONES, 1991).

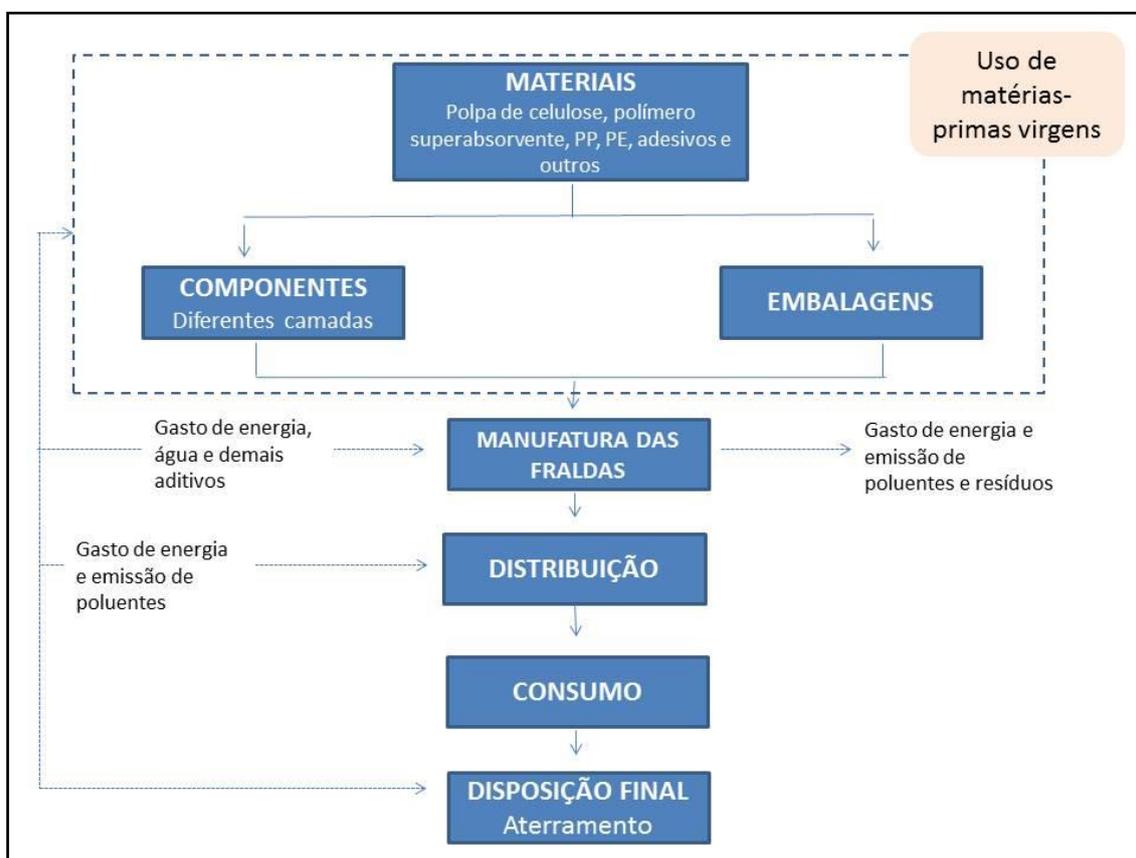
Um fator importante em análises de ciclo de vida (ACV) das fraldas descartáveis é sua destinação final. Dada a escassez de métodos econômica e tecnicamente viáveis de reutilização e reciclagem das fraldas pós-consumo, a grande maioria deste resíduo é, e continuará sendo no futuro próximo, enviada para aterramento como disposição final (LIGHT; CHIRMULEY; HAM, 1995).

3.2.4 Tratamento e destinação final

A nossa sociedade, em geral, seguiu o modelo de produção e descarte linear, conforme pode ser contemplado no fluxograma abaixo. O termo 'linear' se refere ao fluxo de vida dos materiais, os quais são retirados, virgens, da natureza para fabricação de bens de consumo, sendo descartados logo após

seu consumo, quando perdem seu valor. A Figura 4 mostra estas etapas na vida de uma fralda descartável.

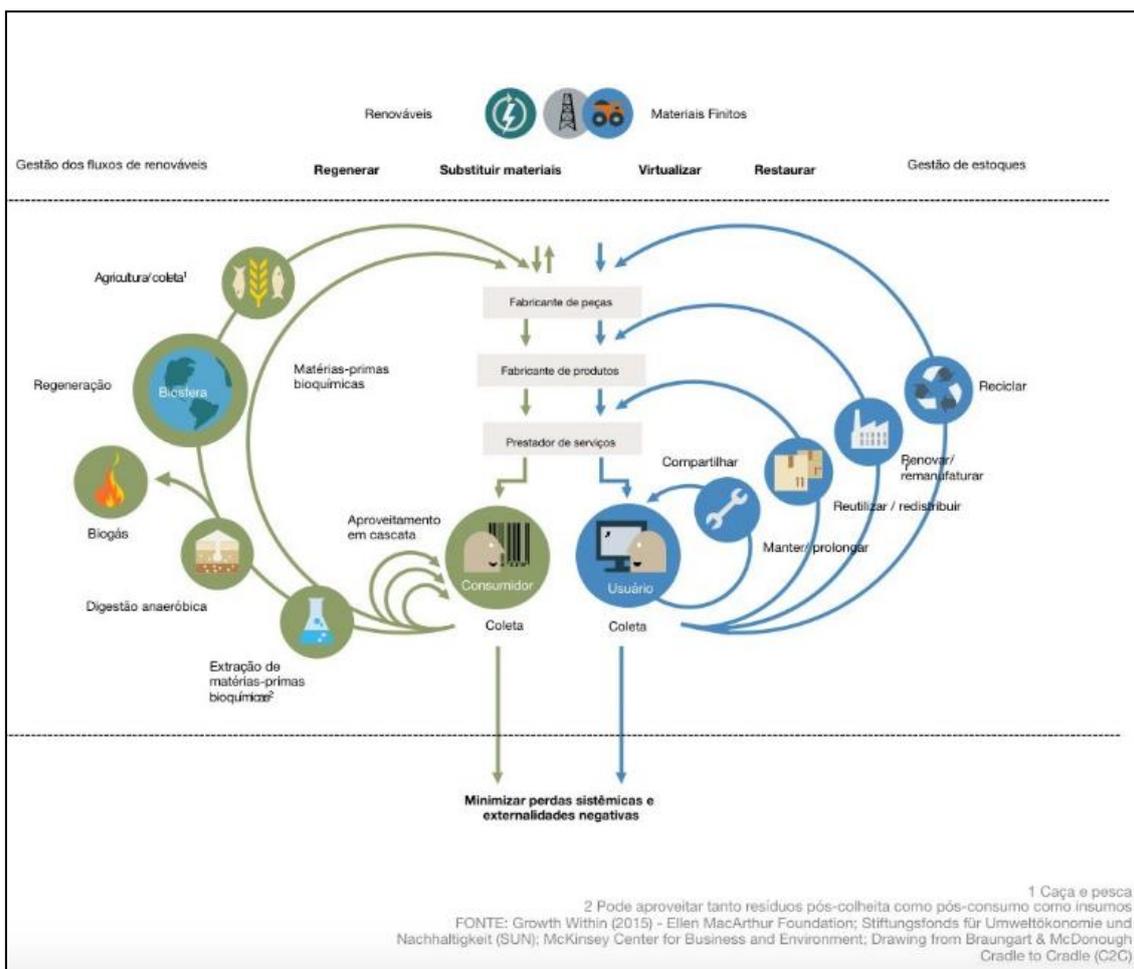
Figura 4 - Fluxograma que indica as etapas de vida de uma fralda descartável, do “berço ao túmulo”, seguindo uma estrutura linear.



Fonte: Adaptado de Cordella et al., 2015 (CORDELLA et al., 2015).

Em contrapartida a este modelo linear, surgiu a economia circular, conceito que se refere a um novo modelo econômico global que visa desassociar o crescimento e desenvolvimento econômico do consumo de recursos naturais finitos. Neste modelo, prioriza-se a maximização da utilidade e do valor dos produtos, materiais e componentes que utilizamos a partir da otimização dos ciclos técnicos e biológicos que os compreende. No chamado ciclo técnico, os materiais têm suas vidas prolongadas e, uma vez atingido este limite de uso, são reutilizados ou, como última instância, reciclados. Nos ciclos biológicos, os materiais atóxicos são geralmente retornados ao solo como nutrientes (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015). Vide Figura 5.

Figura 5 - Diagrama sistêmico da economia circular, com o ciclo biológico à esquerda e o técnico, à direita.



Fonte: Ellen MacArthur Foundation, 2015.

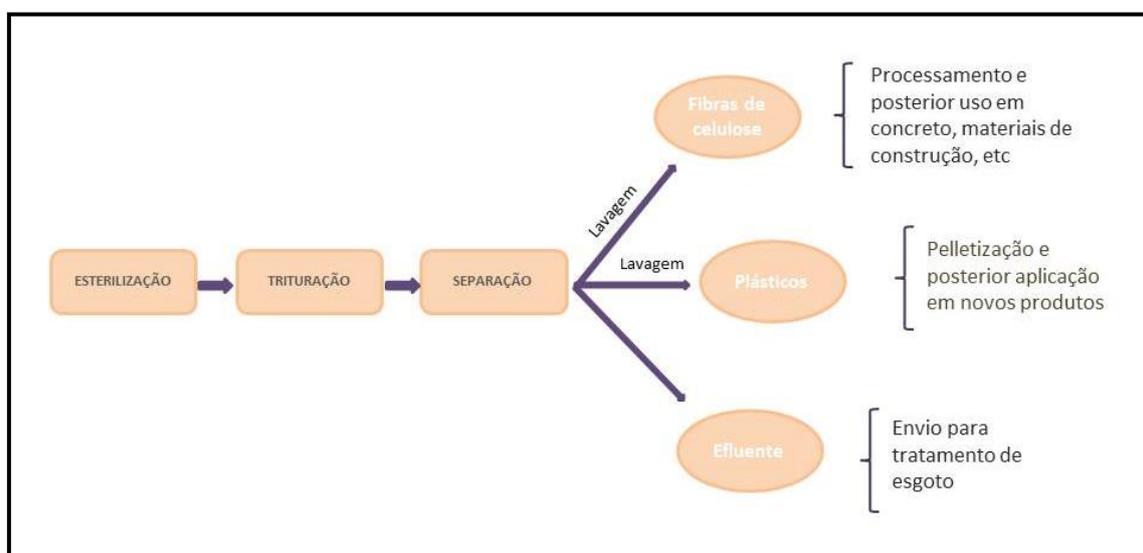
A adoção de medidas mais circulares tanto nos processos produtivos quanto na pós-vida dos produtos implica em benefícios ambientais, por exemplo, pelo uso racional dos recursos naturais e pela redução dos resíduos destinados incorretamente e, conseqüentemente, em benefícios econômicos. Para ilustrar este exemplo, na reciclagem de uma tonelada de plástico economizam-se 5,3 MWh de energia e 500kg de petróleo (SOTTORIVA, 2011).

A reciclagem, então, pode ser vista como uma solução mais circular para os resíduos, uma vez que permite que as matérias-primas voltem às suas cadeias produtivas. Na linguagem da economia circular, ela pode ser vista como um processo capaz de fechar o ciclo técnico do material. Já a compostagem, é um processo que possibilita o fechamento do ciclo biológico do resíduo.

Apesar da complexidade estrutural, de composição e ainda de contaminação que uma fralda descartável pós-consumo pode apresentar, já existem iniciativas de recuperá-las em alguns países.

A empresa canadense Knowaste Technologies, Inc. foi a primeira a reciclar produtos higiênicos absorventes (tradução para *Absorbent Hygiene Products* – AHP) no Reino Unido. Esta classe de produtos abrange as fraldas descartáveis, os produtos para incontinência adulta e os de higiene feminina (KNOWASTE, 2017). O processo de reciclagem pode ser visualizado na Figura 6.

Figura 6 - Fluxograma do processo de reciclagem de fraldas pós-consumo da Knowaste.



Fonte: Elaborado a partir de informações contidas na página web de Knowaste (KNOWASTE, 2017).

De acordo com Zeng, há três coprodutos principais deste processo: a polpa de celulose, os plásticos e o polímero superabsorvente. O primeiro pode ser utilizado na fabricação de papel higiênico ou produtos sanitários; os plásticos podem gerar resinas com propriedade de absorção de óleos industriais e; os polímeros superabsorventes têm aplicação em horticulturas, como material que retém água (WANG; REZAI, 2001).

A Procter&Gamble, gigante no mercado de produtos absorventes higiênicos com a marca Pampers, em parceria com a empresa italiana Fater, desenvolveu um processo de reciclagem mecânica de fraldas descartáveis. O processo é muito similar ao descrito acima e a planta-piloto do projeto tem capacidade para recuperar 8.000 toneladas de fraldas descartáveis por ano (FATER, 2017). O que é feito, hoje em dia, além deste projeto piloto que envolve fraldas pós-consumo, é a reciclagem de resíduos pós-industriais da fabricação de fraldas descartáveis, transformando os materiais em estofamento, em matéria-prima para embalagens ou em matéria-prima para coprocessamento (PERELLA, 2016).

Outra solução para destinação de fraldas descartáveis, que segue um caminho distinto da reciclagem, é sua biodegradação pelo fungo *Pleurotus ostreatus*. Seu nome comum é shimeji-preto e é uma espécie conhecida por sua afinidade em biodegradar materiais ricos em celulose. Estudo conduzido no México confirmou que o cultivo desta espécie de fungo, utilizando fraldas descartáveis pós-consumo como substrato para seu crescimento, consiste em uma boa saída para este problema de resíduos. Resultados indicam que houve redução de mais de 85% na massa e no volume de fraldas após cultivo do fungo (ESPINOSA-VALDEMAR et al., 2011).

Ainda no escopo de utilizar a degradação biológica como saída para o problema de destinação final de fraldas descartáveis, existe a compostagem. Estudo realizado na Espanha comprovou que a inserção de fraldas compostáveis descartáveis no processo de compostagem da fração orgânica dos RSU não altera sua operacionalidade tampouco sua processabilidade. Isso quer dizer que a compostagem de fraldas compostáveis pode ser considerada como um tratamento final adequado, uma vez que não altera a qualidade final do composto gerado (COLÓN et al., 2013).

Uma marca norte-americana de fraldas descartáveis, em sua filial na Nova Zelândia, criou uma parceria com a empresa de soluções para resíduos sólidos para criação de uma planta de compostagem de fraldas descartáveis. Elas são misturadas com resíduos de podas dos municípios a fim de adequar o

processo de compostagem. Desde 2009, início de sua operação, já foram compostadas mais de 19 milhões de fraldas e o produto final é um adubo, utilizado para paisagismo. As fraldas são colocadas em sacos plásticos e biodegradáveis, os quais são depositados em pontos de coleta e, então levados para a planta (PERELLA, 2016).

Todos os processos de tratamento e destinação final descritos acima pressupõem gastos, porém, estes podem ser reduzidos com a geração e venda de produtos, os quais possuem maiores valores agregados (PERELLA, 2016). O processo de reciclagem da empresa Knowaste, por exemplo, pode gerar produtos finais a partir da recuperação das fibras de celulose e do plástico, tais como lixeiras plásticas, material de isolamento e areia higiênica para gatos.

Já os coprodutos gerados a partir do processo desenvolvido pela Fater podem vir a ser bancos para praças, carteiras escolares e tampas de garrafas. Já os processos de compostagem geram adubo, que é utilizado para melhorar a fertilidade do solo. Todos estes exemplos de coprodutos podem ser vendidos, aumentando a sustentabilidade financeira destes projetos que garantem um tratamento adequado deste tipo de resíduo.

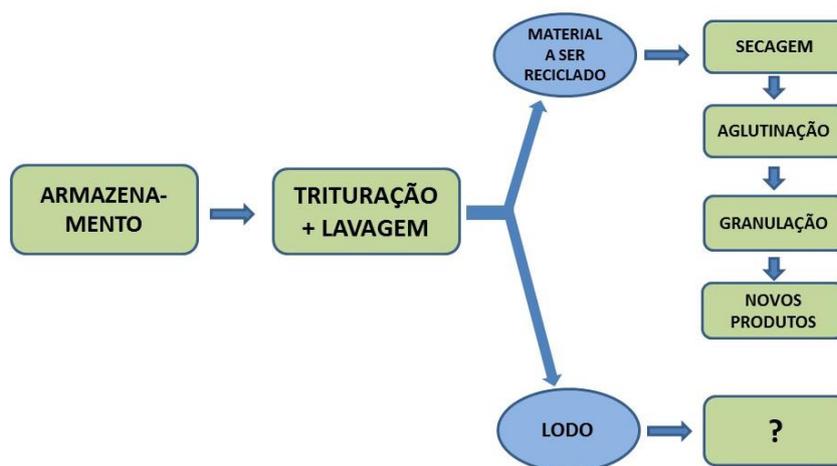
Por fim, há de se considerar a incineração como tratamento adequado de fraldas descartáveis. Esta pode ser uma boa saída para o problema da destinação final deste tipo específico de resíduos, pois implica tanto na redução considerável de volume, quanto na eliminação de quaisquer patógenos presentes no material. Além disso, não requer mudanças estruturais na gestão de resíduos sólidos de uma cidade (CORDELLA et al., 2015).

Por outro lado, a incineração tem como desvantagens a emissão de poluentes gasosos e exige um controle específico de emissões (SMITH et al., 2001). É importante considerar, também, que a incineração é uma forma de tratamento pouco utilizada no Brasil, tendo correspondido a menos de 0,1% da destinação final dos RSU gerados no país em 2008 (BRASIL, 2011).

3.2.5 Processo de reciclagem mecânica

O processo de reciclagem cujo lodo será estudado na presente tese consiste nas seguintes etapas, mostradas na figura a seguir (Figura 7):

Figura 7 - Fluxograma do processo de reciclagem de fraldas pós-consumo estudado.



Fonte: Autora.

Pode-se dizer que o processo de reciclagem em questão é, de certa forma, similar aos desenvolvidos pela canadense Knowaste e pela italiana Fater. No Brasil, no entanto, ele é pioneiro. A etapa principal do processo consiste em dispor as fraldas em uma máquina que realiza tanto a trituração, quanto a lavagem das fraldas, uma vez que utiliza água para viabilizar o processo. Tal máquina utiliza a força centrífuga para expulsar a água, contendo o hidrogel, as fezes, a urina e um pouco de celulose, compondo o lodo, mostrado na Figura 8.

Figura 8 - Imagem tirada do efluente na saída da máquina, onde as fraldas descartáveis são trituradas e lavadas.



Fonte: Autora.

Outro *output* do processo é um material misturado de plástico (PP e PE) e fibras de celulose, como mostra a Figura 9. Este *output* será reciclado, seguindo as etapas de secagem, aglutinação, moagem e extrusão, formando peletes que poderão ser aplicados em produtos plásticos. Apesar de o lodo ser um resíduo deste processo, que visa à recuperação do plástico e da celulose, ele pode ser entendido como um coproduto com potencialidades e aplicações no mercado.

Figura 9 - Material a ser reciclado, composto por plástico e fibras de celulose.



Fonte: Autora.

3.3 Lodo

3.3.1 Definição e legislação

A definição para lodo da NBR nº 12.209/2011 é a seguinte: “suspensão aquosa de componentes minerais e orgânicos separados no sistema de tratamento” (ABNT, 2011). No caso do lodo estudado nesta tese, sua origem é a fase de lavagem e trituração de um processo de reciclagem de fraldas descartáveis pós-consumo.

Uma vez que o processo de reciclagem de fraldas pós-consumo tratado neste trabalho é precursor no Brasil, assim como quaisquer iniciativas de destinação final alternativas ao aterramento, não há legislação que regule esta prática. Sendo assim, torna-se necessária a flexibilização dos termos referentes ao processo de reciclagem de fraldas, para que se adequem à legislação brasileira existente.

O principal exemplo disto é a classificação do lodo gerado no processo de reciclagem de fraldas pós-consumo proposto nesta pesquisa, como sendo similar ao lodo gerado nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs). O esgoto sanitário, tratado em tais estações, consiste em um “despejo líquido constituído de esgotos predominantemente domésticos, água de infiltração e contribuição pluvial parasitária” (BRASIL, 2006 – artigo 2º, inciso V).

A Resolução CONAMA nº 375/06 estabelece os critérios e procedimentos para aplicação de lodo de esgoto gerado em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, em áreas agrícolas. Esta prática visa beneficiar a agricultura, tendo como premissa a supressão de riscos à saúde pública e ao meio ambiente (BRASIL, 2006). Há, ainda, a Norma Técnica da CETESB, P4.230 de 1999, que regula a aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico de despejos líquidos sanitários ou industriais, em áreas agrícolas.

3.3.2 Parâmetros importantes do lodo

O entendimento de qual é a melhor aplicação para o lodo está vinculado à compreensão de quais são os processos de beneficiamento pelos quais ele terá de passar antes de chegar ao seu destino final. Para ambas as decisões, é essencial que alguns parâmetros importantes do lodo sejam analisados:

- Estabilidade

A Resolução CONAMA nº 375 define a estabilidade do lodo a partir da relação entre sólidos voláteis e sólidos totais. O lodo será considerável estável para fins de utilização agrícola caso este valor seja inferior a 0,70, o que quer dizer que ele não apresenta potencial de geração de odores e nem de atratividade de vetores, mesmo quando reumidificado. Um lodo não estabilizado não pode ser utilizado na agricultura, conforme prega a Resolução (BRASIL, 2006).

Para tal parâmetro, é necessário definir quais são os teores de sólidos, tanto totais (ST) quanto voláteis (SV) do lodo. Uma norma que define os ensaios necessários para determinação de tais parâmetros é a Norma NBR 10.664 (ABNT, 1989). Ela define sólidos totais (ST) como sendo o “material remanescente na cápsula após a evaporação parcial da amostra e posterior secagem em estufa à temperatura escolhida, até massa constante”, ou seja, corresponde a tudo aquilo que não é água no lodo. Os ST são divididos entre sólidos fixos (SF) e sólidos voláteis (SV).

Os sólidos fixos correspondem àquelas substâncias dentre os sólidos totais que permanecem na cápsula após calcinação em forno-mufla, realizada a 550°C. Já os sólidos voláteis, como o próprio nome já sugere, são aquelas substâncias dentre os sólidos totais que volatilizaram após a calcinação no forno-mufla (ABNT, 1989). Corresponde ao material orgânico volatilizado e, por isso, é um dos parâmetros mais utilizados para avaliação dos teores de matéria orgânica (USEPA, 2004 *apud* FREDDO, 2014).

- Teor de umidade

A umidade do lodo é um parâmetro complementar ao de ST, uma vez que corresponde à porcentagem de quanto do peso total do lodo equivale à água. Este parâmetro é importante uma vez que sugere por quais processos o lodo necessita passar, como o adensamento e a secagem, para que tenha seu volume reduzido e, assim, apresente economias no armazenamento e transporte.

Uma redução pequena no teor de umidade representa uma diminuição considerável do volume total do lodo. Elevar o percentual de sólidos de um lodo de 1% para 2% a 2,5% significa reduzir o volume de lodo a ser disposto em aproximadamente 50%. Além deste fator, o teor de umidade implicará na qualidade de processos pelos quais o lodo poderá passar, posteriormente, tal como a calagem e a digestão anaeróbia ou aeróbia (PROSAB, 1999).

- Biodegradabilidade

A biodegradabilidade do lodo é um parâmetro importante a ser analisado uma vez que diz respeito ao comportamento do mesmo em processos de estabilização biológica. Dentre as diferentes maneiras de medir este parâmetro, pode-se citar o uso dos indicadores DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) e DQO (Demanda Química de Oxigênio).

A DBO consiste em um indicador que determina indiretamente a concentração de matéria orgânica biodegradável em um lodo ou efluente, a partir da demanda de oxigênio exercida por microrganismos através de sua respiração.

A análise de DBO é um teste comumente utilizado e, no caso da DBO^{5}_{20} , é realizado a uma temperatura constante de 20°C, durante um período de incubação de 5 dias. Este procedimento tem o intuito de retratar, em laboratório, o fenômeno de depuração que acontece em corpos d'água (DERISIO, 1992 apud VALENTE; PADILHA; SILVA, 1997). No esgoto bruto é comum encontrar valores de DBO na faixa de 250 a 400mg/L (RECESA, 2008 apud PINHEIRO, 2012).

A DQO é um indicador similar, pois também determina indiretamente a concentração de matéria orgânica, mas baseia-se na quantidade de oxigênio consumido necessária para oxidar a matéria orgânica, biodegradável ou não, em meio ácido e condições energéticas por ação de um agente químico oxidante forte (VALENTE; PADILHA; SILVA, 1997). No esgoto bruto é comum encontrar valores de DQO na faixa de 450 a 800mg/L (RECESA, 2008 apud PINHEIRO, 2012).

A biodegradabilidade de um lodo ou efluente pode ser medida através da relação DQO/DBO, sendo que maiores valores indicam menor biodegradabilidade e vice-versa. Para valores menores que 5, o lodo ou efluente pode ser considerado biodegradável (PORTO, 1991, apud VALENTE; PADILHA; SILVA, 1997).

3.3.3 Classificação e caracterização posteriores

Uma vez encontrada a aplicação final mais adequada para o lodo, deve-se classificá-lo como resíduo sólido. A norma mais comumente utilizada para classificação de resíduos sólidos no Brasil, atualmente é a norma ABNT NBR 10.004, do ano de 2004. A primeira etapa da classificação envolve a identificação do processo ou atividade que deu origem ao resíduo, de seus constituintes e características, e posterior comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias pré-identificados, cujos impactos à saúde e ao meio ambiente são conhecidos (ABNT, 2004a).

Além do conhecimento acerca da origem do resíduo, é essencial a caracterização do resíduo a partir das características que conferem periculosidade ao resíduo, sendo elas: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. Uma vez definido se o resíduo é perigoso ou não, faz-se necessário caracterizá-lo quanto à sua biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água, o que separa os resíduos não-perigosos entre inertes e não-inertes (ABNT, 2004a).

Uma vez classificado, o resíduo terá sua destinação final restrita, caso seja enquadrado como resíduo perigoso. Caso seja considerado não-perigoso e não-inerte (classe II A) e sua destinação final seja a aplicação na agricultura, o próximo passo é a caracterização mais detalhada do lodo. Por se tratar de um material tão complexo e variável, é necessário saber quais elementos o compõem, e suas respectivas concentrações.

A composição dos lodos varia de acordo com seu local de origem, mas uma vez considerados origens semelhantes (como o lodo de uma ETE que trata águas domiciliares), as variações nas concentrações de seus componentes não são muito significativas. É essencial o conhecimento da composição química do lodo antes de aplicá-lo nas culturas, assim como um acompanhamento da dinâmica dos nutrientes após aplicação no solo, a fim de garantir os benefícios agrônômicos e evitar impactos ambientais negativos (BETTIOL; CAMARGO, 2006).

Como já foi apontada anteriormente, a Resolução CONAMA nº 375 trata deste assunto, e em seu sétimo artigo, especifica quais aspectos devem ser analisados para caracterização do lodo de esgoto. São eles os seguintes (BRASIL, 2006):

- I - potencial agrônômico;
- II - substâncias inorgânicas e orgânicas potencialmente tóxicas;
- III - indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos e;
- IV - estabilidade.

O potencial agrônômico deve ser determinado a partir de componentes tais como: carbono orgânico total (COT), macronutrientes (fósforo, potássio, cálcio,

magnésio, enxofre, sódio e nitrogênio), pH, umidade e quantidade de sólidos (voláteis e totais).

A caracterização química referente às substâncias inorgânicas deve conter análises sobre presença de metais pesados, principalmente. A Resolução também define as concentrações máximas permitidas no lodo de esgoto ou produto derivado para estas substâncias.

Em relação às substâncias orgânicas, é necessário avaliar a presença de benzenos clorados, poluentes orgânicos persistentes (POPs), dioxinas, furanos, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, esteréis de ftalatos e fenóis. Para tais substâncias, são definidas quais as concentrações permitidas no solo.

Em relação aos agentes patogênicos e indicadores bacteriológicos, é necessário determinar as concentrações de: coliformes termotolerantes, ovos viáveis de helmintos, *Salmonella* e vírus entéricos. Para esta categoria de parâmetros, o lodo ou produto derivado poderá ser classificado como classe A ou B, sendo a primeira de maior qualidade (menor presença de patógenos) e a segunda, de menor qualidade (maior presença de patógenos), conforme explicita o Quadro 3. Por fim, a estabilidade do lodo, como já mencionado, é definida a partir da relação entre sólidos voláteis e sólidos totais.

Quadro 2 - Limites máximos de concentração de microorganismos, pela Resolução CONAMA nº375.

Indicador	Lodo Classe A	Lodo Classe B
Coliformes Termotolerantes	≤ 1000 UFP/gST	≤ 1000000 UFP/gST
<i>Salmonella</i>	Ausência em 10 g ST	Não aplicável
Ovos Viáveis de Helmintos	≤ 0,25 ovos/gST	≤ 10 ovos/gST
Vírus Entéricos e Enterovírus	≤ 0,25 UFP/gST	Não aplicável

Fonte: BRASIL, 2006.

Outra norma que pode servir de guia para caracterização do lodo é a Norma Técnica da CETESB, P4.230 de 1999, porém esta é mais antiga e menos completa. O Quadro 3 traz a relação dos parâmetros necessários para caracterização química e microbiológica do lodo (CETESB, 1999):

Quadro 3 - Parâmetros necessários para a caracterização do lodo segundo norma técnica CETESB, P4.230 de 1999.

Carbono orgânico	Arsênio
Fósforo	Cádmio
Nitrogênio amoniacal	Chumbo
Nitrogênio nitrato/nitrito	Cobre
Nitrogênio total ou Nitrogênio Kjeldahl	Cromo total
PH	Mercurio
Potássio	Molibdênio
Sódio	Níquel
Umidade	Selênio
Número Mais Provável (NMP) de <i>Salmonella sp</i>	Sólidos voláteis
Número Mais Provável (NMP) de coliformes fecais	Zinco

Fonte: CETESB, 1999.

A US EPA define como principais propriedades do lodo a serem estudadas as seguintes (MACHADO, 2001):

- Volume de geração, seja através do volume do lodo úmido ou pela massa de sólidos secos;
- Sólidos totais (ST), que influenciará no volume, armazenamento e transporte e disposição final do lodo;
- Sólidos voláteis (SV), parâmetro que corresponde aos componentes orgânicos;
- pH (potencial hidrogeniônico), pois este pode afetar o pH do solo e acarretar em alguns desequilíbrios;
- Matéria orgânica, a qual está diretamente relacionada às propriedades físicas do solo;
- Microorganismos patogênicos, incluindo bactérias, vírus, protozoários e ovos de helmintos;
- Nutrientes, os quais são essenciais para o crescimento dos vegetais, mas que também podem causar contaminação das águas superficiais quando em altas concentrações;
- Metais, que podem ser tóxicos aos humanos, animais e vegetais, em concentrações elevadas e;
- Compostos orgânicos tóxicos, principalmente oriundos de efluentes industriais, produtos domésticos e pesticidas.

3.3.4 Tratamento do lodo

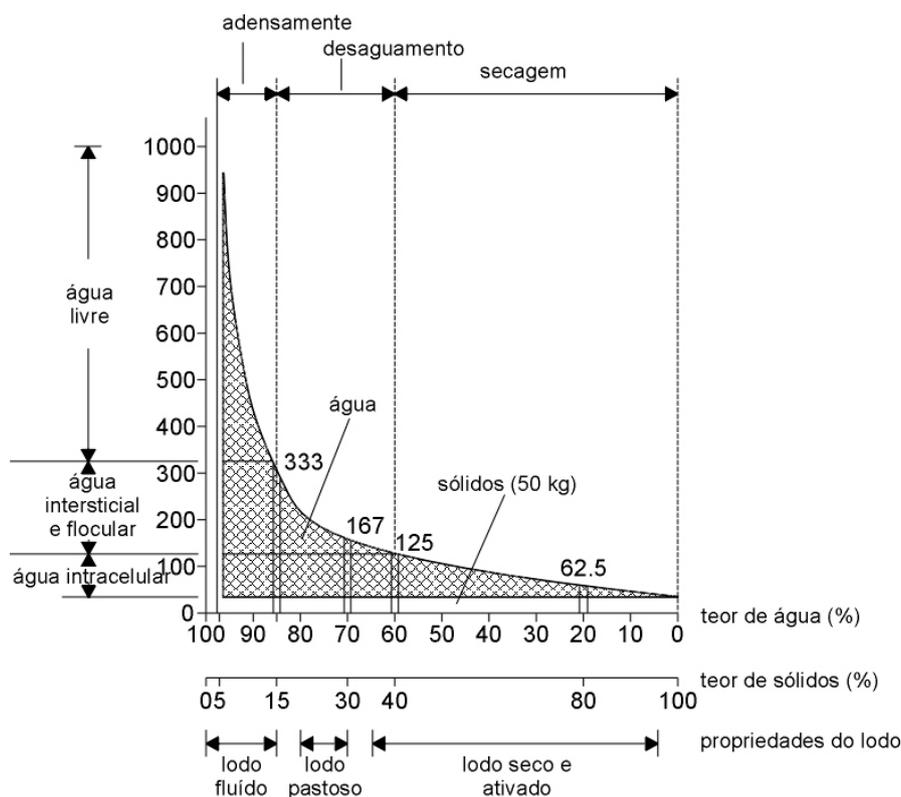
Sabe-se que reduzir a quantidade de geração de lodo acarreta em redução de gastos e, portanto, tem-se investido em técnicas de minimização da produção de lodo em sistemas de tratamento. Isto é feito, geralmente, através dos seguintes procedimentos (CASSINI, 2003):

- Adensamento: remoção de umidade e, conseqüentemente, de volume;
- Estabilização: remoção da matéria orgânica e, conseqüentemente, de sólidos voláteis (SV);
- Condicionamento: preparação para desidratação, geralmente de forma mecânica;
- Desidratação: remoção de umidade e conseqüentemente, de volume;
- Higienização: remoção de organismos patogênicos e, por fim;
- Disposição final: destinação final dos subprodutos.

3.3.4.1 Adensamento

O adensamento do lodo, proveniente de unidades de tratamento, consiste na remoção parcial da água nele contida com conseqüente aumento da concentração de sólidos. Costuma ser um procedimento que precede a desidratação, e as três principais alternativas de adensamento são por gravidade, centrífuga e flotação. Nesta etapa há uma redução expressiva de volume total do lodo, com pequenas variações do teor de sólidos, como se pode ver no Gráfico 7. É interessante reduzir o volume total de lodo, pois isto acarreta em uma redução significativa de gastos com o futuro transporte do lodo (FERREIRA; ANDREOLI, 1999).

Gráfico 6- Variação do volume de lodo em função do seu teor de água.



3.3.4.2 Estabilização

O lodo de esgoto, em seu estado bruto, é rico em patógenos e altamente putrescível. O processo de estabilização tem como objetivo de estabilizar a fração biodegradável da matéria orgânica do lodo, assim reduzindo o risco de putrefação e atração de vetores. Há três tipos de processos de estabilização (LUDUVICE, 2007):

- Biológica: promovida por bactérias específicas, tanto aeróbias quanto anaeróbias, que degradam a matéria orgânica;
- Química: a estabilização ocorre através de oxidações químicas e;
- Térmica: o calor estabiliza a fração volátil do lodo, em recipientes fechados.

O Quadro 4 relaciona os tipos de processos de estabilização de lodo, com as aplicações finais comuns. A estabilização biológica é o tipo mais comum, e pode ser feita por processos tais como: digestão anaeróbia, digestão aeróbia e compostagem. O termo 'digestão' se refere à ação de bactérias sobre o lodo,

dentro de condições favoráveis à sua reprodução e crescimento (LUDUVICE, 2007).

Quadro 4 - Tecnologias de estabilização de lodos, e respectivas disposições finais.

Processo	Aplicação final
Digestão aeróbia ou anaeróbia	Uso restrito na agricultura, como condicionador de solo e fertilizante orgânico. Geralmente é acompanhado de desaguamento e, para uso irrestrito na agricultura, requer desinfecção.
Tratamento químico (estabilização alcalina)	Usado na agricultura e como cobertura para aterro sanitário.
Compostagem	Cobertura de solo apropriada para criação de mudas, horticultura e paisagismo. Utiliza o lodo pré-desaguado.
Tratamento térmico	Produto com alto conteúdo de sólidos, concentração significativa de nitrogênio e livre de patógenos. Uso irrestrito na agricultura.

Fonte: Traduzido de Luduvic, 2007 (LUDUVICE, 2007).

A digestão anaeróbia é o processo mais utilizado no mundo para estabilizar lodos. A digestão ocorre em reatores anaeróbicos fechados, e há quatro principais processos envolvidos: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. O principal produto é o biogás (composto principalmente por metano, CH₄ e dióxido de carbono, CO₂, e outros gases em proporções menores). Em termos de comparação de poder calorífico, um biogás composto por 70% de metano apresenta 62,5% do poder calorífico do gás natural (mistura de metano, propano e butano). Este processo leva a uma significativa redução nas populações de organismos patogênicos, o que favorece que o produto final seja aplicado no solo (LUDUVICE, 2007).

Alguns requisitos do lodo para que a digestão anaeróbia ocorra bem são os seguintes: ausência de materiais inertes tais como areia e plásticos; o teor de sólidos deve estar entre 4% e 8%; ausência de substâncias que inibem a ação

microbiológica, tal como hidrocarbonetos, detergentes, cátions inorgânicos, metais, etc (LUDUVICE, 2007).

A digestão aeróbia é um processo similar à digestão anaeróbia, com algumas diferenças. Primeiramente, os reatores diferem no fato de serem abertos, para permitir a aeração da massa de lodo. Como pré-requisito, o lodo não pode ter um percentual de sólidos maior que 3%. Caso a digestão aeróbia seja termofílica, ou seja, alcance altas temperaturas, o lodo resultante terá populações ainda menores de organismos patogênicos e, ainda, contará com um menor tempo de retenção (LUDUVICE, 2007).

A compostagem também é um método amplamente utilizado para estabilização de lodos, e requer muito controle tanto na fase de dimensionamento quanto na execução. Pode ser feita em reatores fechados ou em leiras (pilhas de compostagem). A ação microbiológica de degradação da matéria orgânica pode chegar a temperaturas de até 80°C, o que contribui para a redução da quantidade de patógenos no lodo. O lodo precisa ter uma concentração de sólidos maior do que nos outros dois casos: maior que 35% (LUDUVICE, 2007).

3.3.4.3 Desidratação ou secagem

Os processos de secagem podem ser naturais ou mecânicos, sendo que para pequenos sistemas, os naturais podem ser mais interessantes. Estes dependem do clima, e também do grau de estabilização do lodo uma vez que um lodo não estabilizado pode provocar problemas de odor e atração de vetores (FERREIRA; ANDREOLI, 1999).

Há dois principais tipos de sistemas naturais de secagem/desidratação (FERREIRA; ANDREOLI, 1999):

- Leitões de secagem: caixas com um sistema de drenagem, que combinam a retirada de água a partir da percolação do excesso de água, o qual é drenado, e a evaporação natural que ocorre devido ao

calor do sol. O lodo final apresenta teor de sólidos em torno de 40% a 75%, e pode-se considerar um ciclo médio de secagem de 25 dias.

- Lagoas de lodo: são sistemas de armazenamento e secagem de lodo pela evaporação da água, e o ciclo de secagem pode durar de 3 a 6 meses.

Em relação aos sistemas mecânicos, há necessidade de que o lodo passe por algum tipo de condicionamento químico prévio, o qual pode ser mineral ou orgânico. O intuito desta etapa é aglomerar as partículas de lodo, sob a forma de redes tridimensionais, facilitando a desidratação. Há quatro principais tipos de secagem mecânica (FERREIRA; ANDREOLI, 1999):

- Centrifugação: o movimento rotativo do lodo gera aumento da força gravitacional, o que leva à sedimentação dos sólidos e remoção de água. Pode ser utilizada tanto no adensamento quanto na desidratação do lodo. O lodo final chega a um teor de sólidos de 20% a 30%.
- Prensa desaguadora contínua: este tipo de maquinário retira a água do lodo combinando drenagem do excesso de água na primeira fase da esteira, seguido de compressão do lodo entre duas esteiras. O teor de sólidos da torta resultante varia de 15% a 20%.
- Filtro prensa: são constituídos por uma série de placas filtrantes, as quais são comprimidas hidraulicamente, forçando a saída da água presente no lodo. A operação é um pouco mais trabalhosa que as demais, mas sua capacidade de concentrar sólidos é boa, gerando tortas com 35% a 50% de sólidos.
- Filtro a vácuo: o lodo é aspirado através de um filtro, que envolve um cilindro rotativo.
- Secagem térmica: a redução da umidade do lodo, neste caso, se dá através da evaporação da água para a atmosfera, com introdução de energia térmica. Os sólidos totais do lodo são mantidos, e apenas a água é removida, chegando a lodos sólidos, com teores de ST da ordem de 90% a 95%. Este processo, diferentemente dos demais, tem a capacidade de eliminação de organismos patogênicos.

3.3.4.4 Higienização

Esta etapa objetiva a eliminação dos organismos patogênicos do lodo, ou seja, sua desinfecção. Esta etapa é de suma importância, uma vez que está vinculada à qualidade sanitária do tratamento do lodo, e sua ausência pode acarretar em problemas de contaminação ambiental e de saúde pública. Há

três princípios mais utilizados que regem este processo: a temperatura, o pH e a radiação.

Alguns dos processos de higienização mais comuns são os seguintes:

- Calagem: também conhecida como 'estabilização alcalina', consiste na mistura de cal virgem ao lodo, em proporções que variam de 30 a 50% do peso seco do lodo. Esta técnica pode ser usada para tratar lodos primários, secundários ou lodos digeridos, tanto em seu estado líquido quando desidratado (PINTO, 2007). O contato da cal com água, ocorre uma reação exotérmica, responsável pelo aumento considerável da temperatura da massa de lodo. Além disso, o aumento do pH para até 12, é responsável por eliminar a totalidade dos patógenos, incluindo os ovos de helmintos, que requerem maior atenção. Os produtos mais utilizados neste processo são a cal virgem (CaO) e a cal hidratada (Ca(OH)₂) (PINTO, 2007).
- Compostagem: o aumento da temperatura, durante a fase termofílica do processo, garante a eliminação da maior parte dos organismos patogênicos.
- Uso de radiação solar: o uso de radiação solar é uma alternativa de método de higienização de lodos, através do processo intitulado 'solarização', que consiste no uso da energia solar para desinfecção do solo, o qual é coberto com um filme plástico transparente, consistindo em um processo hidrotérmico uma vez que a água presente no solo irá evaporar. As temperaturas atingidas neste processo são letais à maioria dos patógenos do solo (KATAN; DEVAY, 1991 *apud* BUENO, 2001). Além desta técnica, há o coletor solar, que é uma caixa de madeira com tubos de ferro galvanizado e uma cobertura de plástico transparente, que permite a entrada dos raios solares, na qual será depositado o lodo a ser desinfetado. Também se concluiu que as temperaturas alcançadas foram suficientes para promover a eliminação dos principais patógenos do bio sólido (GHINI, 1999 *apud* BUENO, 2001).
- Uso de outros tipos de radiação: há também os raios β e γ (Co 60 ou Ce 139), que apresentam eficientes taxas de desinfecção, porém custo elevado.

3.3.4.5 Disposição final

Dados levantados em estudo nos anos de 2000 e 2001 indicam que aproximadamente 50% do lodo gerado em ETEs vão para aterro, 15% são utilizados na agricultura e 35% têm destino indefinido (muito provavelmente,

este destino é aterro). Além disso, os realizadores deste estudo encontraram muitas dificuldades de retorno das agências de saneamento contatadas, o que evidencia uma falta de estruturação nesta área (MACHADO; FIGUEIREDO; FILHO, 2004).

Dados da Alemanha, do ano de 2013, indicam que 14,7% do lodo produzido foram destinados à compostagem, 27,4% à agricultura e os demais 57,9% foram incinerados. Já na Espanha, cerca de 75% do lodo produzido foi destinado à agricultura (EUROSTAT, 2016). Nos EUA, 33% dos lodos de esgoto foram aplicados no solo, sendo que 65% desta fração são destinados à agricultura (SHEARER; SHEARER, 2000 apud MORAES NETO; ABREU; MURAOKA, 2007).

4 METODOLOGIA

4.1 Determinação de DBO e DQO

Os parâmetros de DBO e DQO serão medidos através dos métodos descritos em Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (SMWW, 22ª edição, 2012) em análise laboratorial.

Quadro 5 - Normas utilizadas para análise dos parâmetros de DBO e DQO.

Demanda Química de Oxigênio	SMWW 22ª. Ed. 2012 - 5220 D
DQO - Demanda Química de Oxigênio	
Demanda Bioquímica de Oxigênio	SMWW 22ª. Ed. 2012 - 5210 B
DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio	

4.2 Determinação dos sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV) e sólidos fixos (SF) do lodo e do SAP

Para tal análise, será utilizada a norma NBR 10.664 (ABNT, 1989), que define o método de ensaio para determinação de resíduos (sólidos) em amostras de efluentes, lodos e sedimentos.

O SAP utilizado neste procedimento foi obtido a partir de três fraldas descartáveis. Para tal, foi necessário cortar suas laterais e remover parte do SAP encontrado em seu interior, como mostra a Figura 10. Vale ressaltar que esta amostra continha resquícios de fibras de celulose, as quais se encontram misturadas com o gel no interior da fralda descartável.

Figura 10 - Fralda descartável cortada, para obtenção do SAP.



Fonte: Autora.

O procedimento para determinação dos ST será o seguinte:

- I. Homogeneização das amostras: a fim de obter uma amostra representativa, deve-se homogeneizar a amostra a partir de movimentos mecânicos de mistura.
- II. Pesagem do cadinho: nesta etapa deve-se medir o peso de cada cadinho que será utilizado (P_c); é necessário utilizar cadinhos previamente secados em dessecador, conforme diz a norma NBR 10.664.
- III. Preparo da amostra: no caso do lodo, serão preparadas três amostras (análise em triplicata) com pesos de aproximadamente 30g. O SAP terá analisado sob duas formas diferentes: uma amostra de SAP seco, de aproximadamente 5g, e outra amostra similar com adição de aproximadamente 15 ml de água. Vide Figura 11. As amostras deverão ser posicionadas nos cadinhos, previamente pesados e secados.

Figura 11 - Amostra de SAP seco e de SAP hidratado, respectivamente.



Fonte: Autora.

- IV. Pesagem das amostras: utilizando a função 'tara' da balança de precisão, deve-se pesar cada amostra individualmente e anotar os valores (P_{am}). No caso da amostra de SAP hidratado, deve-se pesar a amostra de SAP antes e depois da adição de água.
- V. Secagem da amostra, em estufa: as amostras serão colocadas em estufa, com temperatura entre 103 e 105°C por aproximadamente 16 horas (Figura 12).
- VI. Pesagem das amostras secas: após retirar as amostras da estufa, deve-se esfriar à temperatura ambiente em dessecador, e pesá-las individualmente (P_{seco}).
- VII. Resultado: o percentual de ST (%) será calculado através da seguinte expressão:

$$\%ST = \frac{(P_{seco} - P_c)}{P_{am}} \times 100$$

Sendo que:

- P_{seco} : Peso do cadinho após estufa, ou seja, peso do cadinho com sólidos totais, em g;
- P_c : Peso do cadinho seco, em g, e;
- P_{am} : Peso da amostra, antes da secagem, em g.

Figura 12 - Cadinhos com amostras dentro da estufa.



Fonte: Autora.

Uma vez determinado o teor de ST das amostras, deve-se seguir o seguinte procedimento para determinação dos SV e SF:

- I. Calcinação: as amostras resultantes do procedimento acima, contendo os ST, devem ser submetidas à calcinação em forno-mufla, a uma temperatura de $550^{\circ}\text{C} (\pm 50^{\circ}\text{C})$, durante uma hora.
- II. Pesagem das amostras: após esfriadas à temperatura ambiente em dessecador, deve-se pesá-las individualmente (P_{calc}). A Figura 13 mostra os cadinhos com algumas das amostras pós-calcinação.
- III. Resultados: o percentual de SF (%) será calculado através da seguinte expressão:

$$\%SF = \frac{(P_{\text{calc}} - P_c)}{(P_{\text{seco}} - P_c)} \times 100$$

Sendo que:

- P_{calc} : Peso do cadinho após calcinação, ou seja, peso do cadinho com sólidos fixos, em g;
- P_{seco} : Peso do cadinho após estufa, ou seja, peso do cadinho com sólidos totais, em g, e;
- P_c : Peso do cadinho seco, em g.

Figura 13 - Cadinhos com amostras após calcinação (direito inferior, com amostra de SAP seco, e demais, com amostra de lodo).



Fonte: Autora.

O teor de sólidos voláteis da amostra é representado pela massa de material que foi volatilizado durante o processo de calcinação, em relação aos sólidos totais, portanto, pode ser calculado através da seguinte subtração:

$$\%SV = 100 - \%SF$$

4.3 Determinação do teor de umidade

O teor de umidade do lodo por ser calculado através da seguinte equação, conforme diz a norma NBR 10.664 (ABNT, 1989):

$$TU (\%) = 100 - \%ST$$

4.4 Discussão sobre as alternativas de tratamento e de aplicações do lodo

O objetivo desta etapa é discutir sobre as diferentes alternativas existentes tanto para tratamento quanto para aplicação do lodo. Serão consideradas as características encontradas nos tópicos 5.1, 5.2 e 5.3, pois estas direcionarão a

discussão. Além disso, entrarão na discussão algumas informações levantadas na revisão bibliográfica sobre propriedades e aplicações do SAP e sobre formas de tratamento de lodos. Com esta discussão, pretende-se chegar a uma solução teórica que seja tecnicamente viável e que dê maior circularidade ao processo de reciclagem de fraldas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Determinação DBO e DQO

Os resultados para as análises de DQO e DBO são as seguintes:

Tabela 2 - Resultados das análises laboratoriais de DBO e DQO.

Parâmetro	Diluição	Resultado	Unidade
DQO	10	5506	mgO ₂ /L
DBO	1	502	mgO ₂ /L

Com estes valores, podemos calcular a razão DQO/DBO, a qual é um indicador de biodegradabilidade do lodo:

$$\frac{DQO}{DBO} = \frac{5506}{502} = 10,97$$

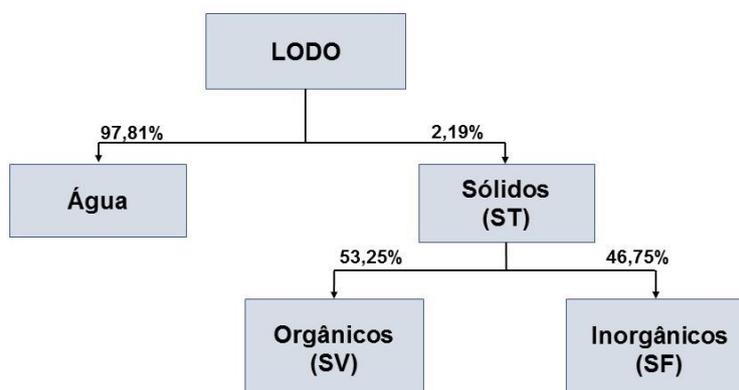
Este valor alto sugere que o lodo em questão seja pouco biodegradável (PORTO, 1991, apud VALENTE; PADILHA; SILVA, 1997). Uma hipótese para este resultado é que a fração polimérica do lodo (composta por resquícios de plástico e celulose, e ainda por uma quantidade considerável de SAP) seja a responsável pela baixa biodegradabilidade do resíduo. Quanto mais complexas as cadeias poliméricas, pior é a eficiência de degradação por parte dos microorganismos.

Este resultado pode interferir na efetividade de processos que envolvam a biodegradação do lodo. Assim, não é indicado que o lodo passe por qualquer processo de estabilização biológica.

5.2 Determinação dos sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV) e sólidos fixos (SF) do lodo e do SAP

O valor médio de ST, SV e SF para o lodo será calculado através de uma média simples entre os resultados encontrados para cada parâmetro, uma vez que a análise foi realizada em triplicata. Os valores encontrados para o lodo são (Figura 14):

Figura 14 - Resultados da série de sólidos (ST, SF e SV) para o lodo, em valores médios.



Fonte: Autora.

O percentual de ST (%ST) indica qual o teor de sólidos totais, em relação ao peso total da amostra. Enquanto o percentual de SF (%SF) indica qual o teor de sólidos fixos em relação aos ST, e o percentual de SV (%SV), o teor de sólidos voláteis em relação aos ST.

Estes resultados indicam que o lodo possui um teor de sólidos totais muito baixo. Além disso, o lodo apresenta teores de SF e SV similares, indicando que, dentre os sólidos presentes, quase metade possui caráter orgânico (volátil) e a outra metade, inorgânico (fixo). Conforme mostra o Gráfico 5, um terço do peso da fralda (33%) vem do SAP. Esta parcela significativa de material polimérico na fralda e, conseqüente, no lodo, pode ser o motivo pelo alto teor de sólidos fixos no lodo, considerando que os excrementos compõem outra parcela significativa da composição do lodo, e este tipo de resíduo é majoritariamente orgânico.

A relação SV/ST do lodo, importante para saber o nível de estabilidade do lodo, é calculada em 0,532, valor que permite que seja considerado estável para fins de utilização agrícola, de acordo com a Resolução CONAMA nº 375 (BRASIL, 2006). Este nível de estabilidade apresentado pelo lodo não quer dizer que ele foi estabilizado por algum processo específico, mas que, por apresentar alto teor de sólidos fixos, é estável. Esta característica, no entanto, não é suficiente

para afirmar que o lodo poderia, por exemplo, ser disposto no solo sem oferecer riscos.

Os resultados da série de sólidos encontrados para o polímero superabsorvente foram os seguintes (Tabela 3):

Tabela 3 - Resultados da série de sólidos (ST, SF e SV) para o SAP seco e hidratado.

Parâmetro	% ST	% SF	% SV
SAP (seco)	87,63	41,28	58,72
SAP (hidratado)	87,84	42,88	57,12

A semelhança entre os resultados obtidos para as duas formas de SAP (seco e hidratado) indica que a alteração em sua cadeia, proveniente da incorporação de moléculas de água, não influencia sobre os teores de sólidos que ele apresenta. Além disso, nota-se que a composição do SAP é majoritariamente orgânica, uma vez que apresenta teor de sólidos voláteis maior que o de sólidos fixos. Mesmo assim, o caráter inorgânico do polímero é relevante, o que pode ser uma possível explicação para o alto teor de SF encontrado no lodo.

5.3 Determinação do teor de umidade

O lodo apresentou um teor de umidade de 97,81%; enquanto o SAP seco apresentou um valor de 12,37% e, o hidratado, de 12,16%, em relação ao peso do polímero seco, antes de sua hidratação. Este resultado para o lodo mostra que ele possui um teor de sólidos muito baixo, sendo necessário que passe por alguns processos de beneficiamento que objetivam a remoção de água, tais como o adensamento e a secagem.

5.4 Discussão das alternativas de tratamento e de aplicações do lodo

Os resultados apresentados nos tópicos anteriores nos permitem uma breve caracterização do lodo estudado, sendo suas principais características:

- Baixa biodegradabilidade, e, conseqüentemente, baixo teor de sólidos;
- Estabilidade relativamente alta;
- Considerável presença de sólidos fixos, ou seja, de matéria inorgânica e;
- Presença de microorganismos oriundos dos excrementos humanos.

De acordo com a característica de alta umidade do lodo, ressalta-se a necessidade do processo de adensamento. O objetivo deste processo, como já foi comentado, é a remoção de parte da água, para que se alcance um teor de ST de aproximadamente 15%. Quanto ao comportamento do lodo neste processo, é possível que a água seja removida juntamente do SAP. Por outro lado, pode ser que a incorporação de parte da água pelas cadeias poliméricas do SAP atrapalhe a eficiência deste processo.

O adensamento pode ser feito a partir de processos que incluem gravidade, centrífuga e flotação, conforme comentado no subcapítulo 3.3.4.1. Em sistemas de adensamento por gravidade, por exemplo, um lodo cujo percentual de sólidos inicial é de 2%, comparável ao lodo estudado, chega a até 5% através da remoção da “água livre”. Esta simples etapa garante uma redução de até 60% no volume total do lodo (GONÇALVES; LUDUVICE; VON SPERLING, 2007). Um processo de adensamento por centrífuga, no entanto, pode ser mais aconselhado a ambientes industriais por exigir menos espaço e infraestrutura.

Quanto à estabilização do lodo, os resultados que indicam pouca biodegradabilidade do lodo, nos levam a crer que a estabilização biológica não seja a mais favorável, pois os microorganismos degradadores provavelmente encontrarão dificuldade em degradar o resíduo. A estabilização térmica tampouco é indicada neste caso, uma vez que requer lodos com altos teores de sólidos, para obtenção de bons resultados. Assim, a estabilização química, como, por exemplo, a calagem, mostra-se como a mais indicada para este lodo.

A calagem, ou estabilização química ou alcalina, atua no lodo de forma a estabilizar a matéria orgânica através de reações químicas exotérmicas, além de eliminar boa parte dos patógenos encontrados no lodo. Este processo poderia constituir, então, uma função dupla de estabilização e higienização. A Resolução CONAMA nº 375 considera a adição de cal como um processo de redução significativa de patógenos, desde que o pH do lodo seja elevado a 12 por, no mínimo, duas horas (BRASIL, 2006).

Em relação à eficiência da calagem, ou caleação, na eliminação de patógenos, estudo conduzido por Tsutiya (2002 apud ROCHA, 2009) observou que em lodos de ETE, analisados 20 dias após adição de 50% de cal, a eliminação de coliformes fecais, salmonelas, estreptococos, cistos de protozoários e larvas de helmintos foi de 100%, enquanto para coliformes totais foi de 99,5% e, para ovos de helmintos, de 77,3%. Para aumentar a eficiência de eliminação de ovos de helmintos, pode-se aumentar o tempo de estocagem do lodo caleado, para alcançar resultados mais satisfatórios em termos sanitários.

Além disso, o tratamento alcalino para remoção de patógenos pode ser otimizado com o aumento da temperatura. Recomenda-se, também, que o lodo seja exposto ao ar livre para secagem após o aumento do pH (PINTO, 2007). Segundo Tsutiya (2002 apud ROCHA, 2009), a cal é um dos produtos alcalinos de menor custo e mais utilizados em saneamento.

Além disso, um processo de desidratação do lodo se fará necessário, uma vez que quanto o maior volume a ser transportado, maiores são os gastos, sendo o fator econômico importante para o projeto. Então, indica-se que o lodo passe por um processo de secagem, tal como um leito de secagem, que é uma solução de secagem de baixo custo, mas que requer pátios de secagem, com precauções em relação a eventos climáticos. Este processo pode originar lodos com percentual de sólidos de até 30% (GONÇALVES; LUDUVICE; VON SPERLING, 2007).

Outra opção é a desidratação mecanizada, através de um filtro-prensa, que requer menos área, sendo assim, mais indicados para ambientes industriais.

Sua operação se dá em bateladas, com ciclos que variam entre 3 e 5 horas de duração. As “tortas” de lodo, como são comumente chamadas, podem chegar a percentuais de ST de até 45% (GONÇALVES; LUDUVICE; VON SPERLING, 2007).

Após estes processos de beneficiamento do lodo, teremos uma “torta” de lodo estabilizado, higienizado e com teor de sólidos significativamente mais alto. O próximo passo, então, é discutir sobre sua aplicação final. É necessário ressaltar que o parâmetro econômico é importante neste momento, ou seja, a escolha por uma aplicação que possa gerar alguma receita é a mais interessante para viabilizar financeiramente o projeto de reciclagem.

De acordo com Luduvic (2007), um lodo que foi estabilizado através de tratamento químico (estabilização alcalina) tem potencial para ser usado na agricultura e como cobertura para aterro sanitário. Dentre estas duas opções, a que apresenta maior potencial econômico e interesse do ponto de vista de circularidade do processo, é a aplicação na agricultura.

É crescente o interesse de utilizar o lodo de esgoto pós-beneficiamento na agricultura, prática que ocorre desde a antiguidade e vem ganhando reconhecimento nos dias de hoje (BETTIOL, CAMARGO; 2006). O principal benefício de tal aplicação é a incorporação dos macronutrientes (nitrogênio e fósforo), dos micronutrientes (zinco, cobre, manganês, ferro e molibdênio) e da matéria orgânica pelas plantas (TSUTIYA, 2001). Pode-se estender este tipo de aplicação ao uso de bio-sólidos em plantios florestais, outra prática comum (MORAES NETO; ABREU JR.; MURAOKA, 2007).

Para que essa opção possa ser considerada viável, é essencial o entendimento prévio do comportamento do SAP após aplicação no solo. Considerando que o polímero não seja eliminado durante os processos de beneficiamento do lodo, pode-se pensar em três possibilidades de “interação” com o meio. O primeiro caso é que a aplicação do bio-sólido contendo SAP não altere as propriedades nem para melhor nem para pior, ou seja, seja neutra. Este cenário poderá ser

constatado a partir de análises frequentes de qualidade de solo e de produtividade do cultivo.

Um segundo cenário é o efeito negativo da aplicação de tal produto no solo, como por exemplo, caso ocorra uma contaminação no meio. Ela poderá ser agravada pela permanência do polímero no solo, dada sua baixa biodegradabilidade; neste caso, pode-se avaliar a possibilidade de biorremediação do solo utilizando espécies de fungo capazes de degradá-lo, tal como *Aspergillus niger* (SANDONATO, 2011) ou *Phanerochaete chrysosporium* (STAHL et al., 2000).

Por fim, deve-se considerar o cenário de efeito positivo, através da melhoria do solo com a presença do SAP, como já foi discutido na seção 3.2.2.3. Neste caso, o SAP atuaria como um condicionador do solo, aumentando a disponibilidade hídrica para as plantas, fornecendo uma liberação gradual dos nutrientes presentes no solo e no biossólido e, assim, otimizando o cultivo.

No entanto, é necessário alertar para a necessidade do controle e respeito às normas vigentes, para que os impactos positivos da aplicação de biossólido como fertilizante superem os riscos de poluição ambiental (TRANNIN; SILVEIRA; MOREIRA, 2008). Caso a alternativa de utilizar o lodo beneficiado na agricultura como fertilizante ou condicionador de solos seja escolhida, sua aplicação deverá seguir os critérios de normas tais como a Resolução CONAMA nº 375 e a norma técnica da CETESB, P4.230 de 1999. Estas normas, no entanto, regem o uso agrícola de lodos originados em ETEs e em sistemas de tratamento biológico de despejos líquidos sanitários ou industriais, respectivamente.

A alternativa de dispor o lodo beneficiado em aterros sanitários é válida em termos técnicos, mas, por outro lado, contraria a tendência mundial de redução do envio de resíduos sólidos para aterros, e também os objetivos da PNRS. Além de apresentar custos de disposição, a opção de aterramento traz impactos ambientais negativos, conforme discutido no item 3.1.3.

Por fim, pode-se considerar como alternativa de aplicação do lodo beneficiado o reuso industrial, como forma de reduzir o uso de matéria-prima em diversos materiais usados na construção civil. O lodo de esgoto digerido, por exemplo, pode ser aplicado na fabricação de agregados leves, após passar por inúmeras etapas, sendo algumas delas a secagem, a peletização, a sinterização e a britagem (BROSCH; ALVARINHO; SOUZA, 1975).

O lodo de ETE também pode ser utilizado na fabricação de tijolos, como mostra o exemplo encontrado na África do Sul, pioneiro na área. A parcela referente ao lodo chega a ser de até 30% do volume total do tijolo, o que resulta em economia de água, redução do peso do tijolo, por exemplo, além de que não há alterações na qualidade e aparência dos tijolos feitos a partir da valorização do lodo (WERTHER; OGADA, 1999 *apud* SANTOS; JOHN; COELHO, 2004).

No Brasil também foram conduzidos estudos acerca da aplicação de lodo de esgoto de ETEs na indústria cerâmica, mais especificamente para tijolos, tradicionalmente feitos com argila. A aplicação mostra-se viável uma vez que os resultados são positivos para testes de absorção de água, umidade de extrusão retração e resistência dos tijolos, e ainda, não há resquícios de odor proveniente do lodo (PIRES; GERALDO; ZECHINATTI, 2002).

Uma vez que a composição do lodo estudado neste trabalho e de lodos oriundos do tratamento de esgoto é consideravelmente diferente, não há garantia de que o desempenho do lodo de fraldas descartáveis seja igual. Por outro lado, conforme discutido no item 3.1.3, o SAP, possivelmente presente no lodo, tem sido aplicado de forma semelhante em materiais como cimento e cerâmica, como melhorador de algumas propriedades destes materiais (SANTOS, 2015). Esta alternativa de aplicação, então, apresenta potencial de apresentar bons resultados técnicos e ambientais.

6 CONCLUSÃO

Os resultados deste trabalho nos permitem concluir que:

- O lodo apresentou uma fração orgânica menos expressiva do que a esperada, uma vez que é composto, principalmente, por excrementos humanos. Considerando o percentual de sólidos totais e de sólidos voláteis encontrados, tem-se pouco mais de 1%, em peso, de material orgânico no total do lodo. O lodo apresentou baixa biodegradabilidade, tanto pelo alto valor da relação entre DQO e DBO, de 10,97, quanto pelo alto teor de SF obtido.
- O lodo apresentou um alto teor de umidade (97,81%), tornando necessários processos de adensamento e secagem, prévios a qualquer tipo de destinação final. Esta característica relaciona-se diretamente com os custos de transporte do lodo, uma vez que quanto maior o volume a ser transportado, maior o gasto financeiro atrelado a esta atividade.
- Como alternativas de tratamento do lodo, foi sugerido que as seguintes etapas fossem seguidas: adensamento por centrifugação, calagem (estabilização alcalina) e secagem por filtro-prensa.
- Em relação às aplicações finais do lodo beneficiado (pós-tratamento), sugere-se que sejam realizados estudos mais aprofundados acerca da viabilidade técnica das seguintes opções: aplicação no solo, como fertilizante agrícola ou condicionador de solo; uso na produção de materiais de construção civil, como o cimento e a cerâmica, e; aterramento. A princípio, a destinação do lodo beneficiado ao aterro sanitário mostra-se como a opção mais adequada.

Vale ressaltar que as alternativas de tratamento do lodo deverão passar por alguns testes iniciais, assim como as aplicações sugeridas deverão obedecer aos critérios de qualidade que dizem respeito à cada uma. A discussão final em relação às aplicações do lodo é de cunho teórico e seu aprofundamento deve ser entendido como sugestão de próximos passos.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho é parte importante de um projeto que visa oferecer uma solução de reciclagem para fraldas descartáveis pós-consumo. Tal projeto ainda se encontra na fase de testes e aperfeiçoamentos técnicos, então, ainda restam estudos a serem feitos e processos a serem otimizados. A fim de enriquecer os frutos deste trabalho, são colocadas algumas considerações finais, que podem ser entendidas como sugestões de próximos passos. São elas:

- I. Análise quantitativa e qualitativa da água retirada do lodo durante o processo de desidratação no filtro-prensa. Neste caso, seria interessante analisar se este efluente possui os requisitos mínimos para atender aos padrões de lançamento em rede coletora de esgoto, de acordo com o Decreto estadual nº 8.468 (artigo 19º; SÃO PAULO, 1976).
- II. Estudo econômico de cada uma das alternativas de tratamento e destinação final levantadas.
- III. Testar modificações no processo de lavagem e trituração das fraldas, que visem a redução da geração de lodo.
- IV. Classificação do lodo resultante como resíduo sólido, de acordo com a norma ABNT NBR 10.004, de 2004.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPHEC. **Com aumento da renda, Brasil já é o terceiro maior consumidor de fralda descartável do mundo.** Disponível em:

<<https://abihpec.org.br/2014/10/com-aumento-da-renda-brasil-ja-e-o-terceiro-maior-consumidor-de-fralda-descartavel-do-mundo/>>. Acesso em: 23 fev 2017.

ABRELPE. **Panorama de resíduos sólidos no Brasil 2015.** São Paulo, 2015.

Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2015.pdf>>.

Acesso em 23 jan 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10.664** – Águas – Determinação de resíduos (sólidos) – Método gravimétrico. Rio de Janeiro, 1989. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10.004** – Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004a. 63p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12.209** – Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários. Rio de Janeiro, 2011. 53p.

BETTIOL, W. CAMARGO, O. A. A disposição do lodo de esgoto em solo agrícola. In: _____. **Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura.** 1 ed. Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, 2006. p. 25-35.

BRANDÃO, J. R. **Análise de sistemas de valorização de resíduos via compostagem e reciclagem e sua aplicabilidade nos municípios mineiros de pequeno porte.** 2006. 102 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Administração Municipal – IBAM. **Manual Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos.** 2001. Disponível em: <<http://www.resol.com.br/cartilha4/manual.pdf>>. Acesso em 18 jan 2017.

BRASIL. Ministério Do Meio Ambiente - Conselho Nacional Do Meio Ambiente. **Resolução nº 375**, de 29 de agosto de 2006. Publicada no DOU nº 167, de 30 de agosto de 2006, Seção 1, p. 141-146.

BRASIL. Governo Federal, **Lei nº 12.305**, de 02 de agosto de 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm>. Acesso em: 20 dez 2016.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos.** Versão preliminar para Consulta Pública. Brasília, 2011. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/253/_publicacao/253_publicacao02022012041757.pdf>. Acesso em: 21 dez 2016.

BROSCH, C.D.; ALVARINHO, S. B.; SOUZA, H. R. Produção de “agregado leve” a partir do lodo de esgoto. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária, núm 8, 1975, Rio de Janeiro. Pesquisa realizada através do convênio SABESP/IPP. Revista DAE.

BUENO, R. C. R. Biossólido: processo de redução adicional de patógenos com a utilização de energia solar. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, n. 21, 2001. João Pessoa. **Resumo de trabalho técnico**. São Paulo: ABES – Trabalhos Técnicos, 2001.

CALDERONI, Sabetai. **Os bilhões perdidos no lixo**. 3. ed. São Paulo, SP: Humanitas, 1999.

CASSINI, R. T. Digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento de biogás. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003. 210 p.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Norma P.4.230. Aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas: critérios para projeto e operação. **Manual Técnico**. São Paulo: 1999.

COLÓN, J. et al. Performance of compostable baby used diapers in the composting process with the organic fraction of municipal solid waste. **Waste Management**, vol 33, Barcelon, p. 1097–1103, 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X13000482>>. Acesso em: 25 fev 2017.

CORDELLA, M. et al. Evolution of disposable baby diapers in Europe: life cycle assessment of environmental impacts and identification of key areas of improvement. **Journal of Cleaner Production**, vol 95, p. 322–331, maio 2015. Disponível em: <322e331. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615001535>>. Acesso em: 2 fev 2017.

COUTINHO, F. M. B., MELLO, I. L, SANTA MARIA, L. C. Polietileno: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, Rio de Janeiro, nº 1, vol 13, p. 1-13, 2003.

DHODAPKAR, R., BORDE, P., NANDY, T. Super absorbent polymers in environmental remediation. **Global NEST Journal**, Índia, vol 11, núm 2, p. 223-234, 2009.

EDANA (International Association Serving the Nonwovens and Related Industries). **Sustainability Report**: Baby diapers and incontinence products. EDANA: Bruxelas, 2005.

EDANA (International Association Serving the Nonwovens and Related Industries). **Sustainability Report 2007-2008**: Absorbent Hygiene Products. EDANA: Bruxelas, 2008.

EDANA (International Association Serving the Nonwovens and Related Industries). **Sustainability Report**. EDANA: Bruxelas, 2011.

EDANA (International Association Serving the Nonwovens and Related Industries). **Sustainability Report**. Ed 4. EDANA: Bruxelas, 2015.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Circularity Indicators**: An Approach to Measuring Circularity - Project Overview. Reino Unido, 2015.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Municipal Solid Waste**. 2013. Disponível em: <<https://archive.epa.gov/epawaste/nonhaz/municipal/web/html/>>. Acesso em 21 jan 2017.

EUROSTAT. **Environmental data centre on waste**. 2014 *apud* MANNARINO, C. F., FERREIRA, J. A., GANDOLLA, M. Contribuições para a evolução do gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no Brasil com base na experiência Europeia. **Eng Sanit Ambient.**, v.21 n.2, 379-385, abr/jun 2016.

EUROSTAT – ENVIRONMENTAL DATA CENTRE ON WASTE. Sewage sludge production and disposal. 2016. Disponível em: <http://ec.europa.eu/eurostat/web/products-datasets/-/env_ww_spd>. Acesso em: 02 mai 2017.

ESPINOSA-VALDEMAR, R. M., et al. Disposable diapers biodegradation by the fungus *Pleurotus ostreatus*. **Waste Management**, vol 31, p. 1683-1688, 2011.

FANARO, S., et al. Intestinal microflora in early infancy: composition and development. **Acta Paediatr Suppl**, Itália, núm 91, p. 48-55., 2003. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14599042>>. Acesso em 23 abr 2017.

FATER. **Projeto reciclagem**. 2017. Disponível em: <<http://www.fatergroup.com/pt/news/communiqu%C3%A9s-de-presse/projeto-reciclagem>>. Acesso em 13 fev 2017.

FERREIRA, A. C., ANDREOLI, C. V. Produção e características dos bio-sólidos. Curitiba: 1999. “In: SANEPAR, PROSAB, Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura”: cap. 1. p. 8-18.

FREDDO, A. **Caracterização físico-química de lodo proveniente de duas estações de tratamento de esgoto da região oeste do Paraná**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Coordenação de Engenharia Ambiental, Medianeira, 2014.

GDIAPERS. **Why gDiapers**. 2017 Disponível em: <<https://www.gdiapers.com/pages/getting-started#why>>. Acesso em 09 fev 2017.

GOMEZ, J. S. **Characterization and effects of cross-linked potassium polyacrylate as soil amendment**. 2015. Tese de Doutorado – Universidad de Sevilla - Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola, Sevilla, 2015. Disponível em: <https://idus.us.es/xmlui/bitstream/handle/11441/40617/Jorge_Sanz_Gomez_Tesis_Doctoral.pdf;sequence=1>. Acesso em: 14 abr 2017.

GONÇALVES, R.F., LUDUVICE, M., VON SPERLING, M. Sludge thickening and dewatering. Londres: IWA Publishing, 2007. “In: VON SPERLING, M.”: Sludge treatment and disposal, cap 5, p. 76-119.

GUIMARÃES, L. F. In: KRUGLIANSKAS, I., PINSKY, V. C. **Gestão Estratégica da Sustentabilidade**: Experiências Brasileiras. Elsevier Brasil, 2014, cap. 2, p. 35–60.

HORIE et al. Definitions of terms relating to reactions of polymers and to functional polymeric materials: IUPAC Recommendations 2003. Tóquio, 2004 *apud* CORDELLA, M. et al. Evolution of disposable baby diapers in Europe: life cycle assessment of environmental impacts and identification of key areas of improvement. **Journal of Cleaner Production**. Vol 95, p. 322–331, maio 2015.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo demográfico 2010**: características da população e dos domicílios: resultados do universo. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: <biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=793>. Acesso em 25 fev 2017.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA - IPEA. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos**: relatório de pesquisa. Brasília, 2012. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf>. Acesso em 21 jan 2017.

KAWAI F., et al. Proposed Mechanism for Bacterial Metabolism of Polyacrylate. **Journal of Environmental Polymer Degradation**, vol, 2, núm 2, p. 59-65, 1994. Disponível em: <<https://eurekamag.com/pdf.php?pdf=009261005>>. Acesso em: 20 abr 2017.

KHATIB, I. A. Municipal Solid Waste Management in Developing Countries: Future Challenges and Possible Opportunities. **Integrated Waste Management**, Palestina, vol 2, p. 36-48., 2011. Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/integrated-wastemanagement-volume-ii>>. Acesso em: 25 jan 2017.

KNOWASTE. **Recycling process**. 2017. Disponível em: <<http://www.knowaste.com/process>>. Acesso em: 13 fev 2017.

LEHRBURGER, C., MULLEN, J., JONES, C. V. **Summary diapers**: environmental impacts and lifecycle analysis. Pensilvânia: The National Association of Diaper Services (NADs), 1991.

LEITE, R. M. O. 2009 **Os princípios do poluidor pagador e da precaução**. Disponível em: <<http://www.conjur.com.br/2009-set-17/principios-poluidor-pagador-precaucao-direito-ambiental>>. Acesso em: 13 mar 2017.

LIGHT, K.L., CHIRMULEY, D.G., HAM, R.K. A laboratory study of the compaction characteristics of disposable diapers in a landfill. **Resources, Conservation and Recycling**, Estados Unidos, vol 13, p. 89-96, 1995.

LIXO. Tempo de decomposição. 2017. Disponível em: <<http://www.lixo.com.br/content/view/146/252/>>. Acesso em: 23 jan 2017.

LUDUVICE, M. **Sludge stabilization**. Londres: IWA Publishing, 2007. "In: VON SPERLING, M.": Sludge treatment and disposal, cap 4, p. 48-75.

MACHADO, M. F. S. **A situação brasileira dos biossólidos**. 2001, 282 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Saneamento e Ambiente) - Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2001.

MACHADO, M. F. S., FIGUEIREDO, R. F., FILHO, B. C. Produção brasileira de lodos de esgotos. **Sanare** - Revista Técnica da Sanepar, Paraná, v. 22, n. 22, jul/dez, 2004.

MANNARINO, C. F., FERREIRA, J. A., GANDOLLA, M. Contribuições para a evolução do gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no Brasil com base na experiência Europeia. **Eng Sanit Ambient.**, v.21 n.2, 379-385, abr/jun 2016.

MIGNON, A. et al. Crack Mitigation in Concrete: Superabsorbent Polymers as Key to Success? **Materials**, Bélgica, núm, 10, 237, 2017. Disponível em: < <http://www.mdpi.com/1996-1944/10/3/237>>. Acesso em 23 abr 2017.

MORAES NETO, S. P. M., ABREU JR, C. H., MURAOKA, T. Uso de biossólido em plantios florestais. **Documentos 202**, Embrapa Cerrados, Planaltina - DF, 2007.

PEREIRA, M. B. et al. Estudos de biodegradação de poliacrilato de sódio, utilizando *phanerochaete chrysosporium*. In: **Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química**, núm 31, 2008, Águas de Lindóia.

PERELLA, M. **Billions of dirty nappies can be turned into pet litter, insulation and compost**, 2016. The Guardian, Sustainable business. Disponível em: <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2016/sep/06/billions-dirty-nappies-diapers-recycled-pet-litter-insulation-compost-waste-landfill>>. Acesso em: 14 fev 2017.

PIATTI, T. M., RODRIGUES, R. A. F. **Plásticos**: características, usos, produção e impactos ambientais. 2005. Série: Conversando sobre ciências em Alagoas – EDUFAL, Maceió, 2005.

PINHEIRO, A. V. **Alternativas para destinação final do lodo gerado no tratamento de esgoto sanitário**. 2012. Trabalho Final de Curso (Engenharia Civil) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia da UFJF, Juiz de Fora, 2012.

PINTO, M. T. Pathogen removal from sludge. Londres: IWA Publishing, 2007. "In: VON SPERLING, M.": Sludge treatment and disposal, cap 6, p. 120-148.

PIRES, G. T., GERALDO, R. H., ZECHINATTI, V. H. Adição de lodo de esgoto da E.T.E. do município de Jaguariúna em tijolos cerâmicos: estudo de viabilidade. **Revista Intellectus**, Ano 8, núm 22, p. 143-159, 2002.

POCOCK, S. **Time to Change?** A study of how parents and carers use disposable and reusable nappies. Environment Agency, Reino Unido, jul 2005.

PROSAB (Programa de Pesquisa em Saneamento Básico). **Manual prático para a compostagem de bio sólidos**. Rio de Janeiro: ABES, 1999. 91 p. Disponível em: < https://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/Livro_Compostagem.pdf>. Acesso em 13 mar 2017.

RICHER, C. **Disposable Diaper History**. The Disposable Diaper Industry Source. Disponível em: < http://disposablediaper.net/?page_id=14>. Acesso em: 25 jan 2017.

ROCHA, A. L. C. L. **Higienização de lodo anaeróbio de esgoto por meio alcalino**: estudo de caso da ETE Lages – Aparecida de Goiânia – GO. 2009. Dissertação (Programa de Pós-Graduação - Engenharia do Meio Ambiente) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

QU, G., VARENNES, A. Use of hydrophilic polymers from diapers to aid the establishment of *Spergularia purpurea* in a mine soil. **Journal of Hazardous Materials**, vol 178, p. 956–962, 2010.

ROSA, F.; BORDADO, J. M.; CASQUILHO, M. Polímeros superabsorventes: potencialidades e aplicações. **Revista Ingenium**, Lisboa, p.156 –158, 2007. Disponível em: <http://web.tecnico.ulisboa.pt/~mcasquilho/compute/_fitting/Ing98-DC_Quim8.pdf>. Acesso em: 19 fev 2017.

SANDONATO, B.B. **Método de avaliação e biodegradação do poliacrilato de sódio**. 2011. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Ecologia) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências de Rio Claro, São Paulo, 2011.

SANINNO, A., DEMITRI, C., MADAGHIELE, M. Biodegradable Cellulose-based Hydrogels: Design and Applications. **Materials**: Itália, vol 2, p. 353-373, 2009.

SANTOS, A. D., JOHN, V. M., COELHO, A. C. V. Reciclagem do lodo de esgoto — uma alternativa de gestão. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, núm 10, 2004, São Paulo.

SANTOS, R. V. A. Polímeros superabsorventes: processos de produção, aplicações e mercado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.

SÃO PAULO. Governo do Estado de São Paulo. **Decreto nº 8.468**, de 8 de setembro de 1976. Prevenção e o Controle da Poluição do Meio Ambiente. São Paulo, 1976. Disponível em: <www.unesp.br/pgr/pdf/decreto_8468_1976.pdf>. Acesso em: 20 mai 2017.

SCHWIERTZ, A. et al. Development of the Intestinal Bacterial Composition in Hospitalized Preterm Infants in Comparison with Breast-Fed, Full-Term Infants **Pediatric Research**, Alemanha, núm 54, p. 393–399, 2003. Disponível em: <<https://www.nature.com/pr/journal/v54/n3/full/pr2003414a.html>>. Acesso em 23 abr 2017.

SLADE, G. **Made to Break: Technology and Obsolescence in America**. Cambridge: Harvard University Press, 2007.

SMITH, A. et al. **Waste management options and climate change**. Luxemburgo, AEA Technology, 2001.

SMITH, R. **Biodegradable polymers for industrial applications**. 1. ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2005. 532 p.

SOTTORIVA, P. R. S. Análise do ciclo de vida dos resíduos recicláveis e perigosos de origem domiciliar. **REDES**, Santa Cruz do Sul, v. 16, n. 3, p. 62 – 79, 2011.

STAHL, J. D. et al. Biodegradation of Superabsorbent Polymers um Soil. **ESPR - Environmental Science and Pollution Research**, [S.I.], vol 7, núm 2, 2000, p.83 – 88. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Steven_Aust/publication/23473763_Biodegradation_of_Superabsorbent_Polymers_in_Soil/links/00b7d5194fb0923dce000000.pdf>. Acesso em: 24 abr 2017.

STEGMANN, R. et al. Fate of na absorbent gelling material for hygiene products in landfill and composting. **Waste management & Research**, Alemanha, vol 11, p. 155-170, 1993.

TISSUE. **O difícil mundo das fraldas no Brasil**. [2016?]. Disponível em: <<http://tissueonline.com.br/o-dificil-mundo-das-fraldas-no-brasil/>>. Acesso em: 28 fev 2017.

TORRES, V.; BORGER, F. G. In: KRUGLIANSKAS, I., PINSKY, V. C. **Gestão Estratégica da Sustentabilidade: Experiências Brasileiras**. Elsevier Brasil, 2014, cap. 7, p. 149–171. Disponível em: <

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9788535275490000077>>. Acesso em: 20 dez 2016.

TORRIJOS, M. et al. Treatment of the biodegradable fraction of used disposable diapers by co-digestion with waste activated sludge. **Waste Management**, vol 34, França, p. 669–675, 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X1300562X>>. Acesso em: 20 fev 2017.

TRANNIN, I. C. B.; SILVEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S. Atributos químicos e físicos de um solo tratado com biossólido industrial e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 3, p. 223-230, 2008.

TSUTIYA, M. T. Qualidade de biossólidos produzidos em estações de tratamento de esgotos da região metropolitana de São Paulo. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, n. 21, 2001. João Pessoa. **Resumo de trabalho técnico**. São Paulo: ABES – Trabalhos Técnicos, 2001.

VALENÇA, A. C. **Produtos florestais – Fraldas descartáveis**. Rio de Janeiro: BNDES, 2002.

VALENTE, J. P. S., PADILHA, P. M., SILVA, A. M. M. Oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO) como parâmetros de poluição no ribeirão Lavapés/Botucatu – SP. **Eclética Química**, São Paulo, vol. 22, 1997. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-46701997000100005>. Acesso em 25 abr 2017.

VARENNES, A., GOSS, M. J., MOURATO, M. **Remediation of a Sandy Soil Contaminated with Cadmium, Nickel, and Zinc using an Insoluble Polyacrylate Polymer**. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*: [S.I.]: Taylor & Francis, 2006, vol. 37, núm 11, p. 1639 – 1649. Disponível em: <https://atrium.lib.uoguelph.ca/xmlui/bitstream/handle/10214/2667/devarennese_tal_2006.pdf?sequence=1>. Acesso em: 25 mar 2017.

VIDAL, A. C. F., HORA, A. B. Celulose de fibra longa: uma oportunidade para a indústria brasileira? **BNDES Setorial** vol. 39, p. 281-342, s.d. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br/bibliotecadigital>>. Acesso em: 13 fev 2017.

WANG, L., REZAI, E. In: OSADA, Y. et al. **Gels Handbook: The fundamentals**. Academic Press: 2001. Vol 3, cap 3, seção 1. p. 4-20.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

AMANN, R. et al. **Biodegradation of synthetic polymers in the aquatic environment**. Alemanha, BASF. 2010. Disponível em: <<http://elib.suub.uni-bremen.de/edocs/00101809-1.pdf>>. Acesso em: 10 abr 2017.

CAMPOS, L. M. S., MELO, D. A. Indicadores de desempenho dos Sistemas de Gestão Ambiental (SGA): uma pesquisa teórica. **Produção**, v. 18, n. 3, p. 540-555, 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/prod/v18n3/a10v18n3>>. Acesso em: 05 abr 2017.

CHIBA, M. K. **Uso de lodo de esgoto na cana-de-açúcar como fonte de nitrogênio e fósforo: parâmetros de fertilidade do solo, nutrição da planta e rendimentos da cultura**. 2005. Tese (Doutorado – Agronomia: solos nutrição e plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2005.

CHIELLINI, E. et al. Biobased Polymeric Materials for Agriculture Applications. **POLIMERY**, vol. 47, Pisa – Itália, p. 21-27, 2002. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/281366986_Biobased_Polymeric_Materials_for_Agriculture_Applications?enrichId=rgreq-1393c50d5604a2d45c7025bb4e58200b-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI4MTM2Njk4NjtBUzoyNzA3ODEyMTMwNDg4MzJAMTQ0MTU3MDY4MDMxNg%3D%3D&el=1_x_2&_esc=publicationCoverPdf>. Acesso em: 12 mar 2017.

MELO, W; J., MARQUES, M. O. Potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas. In: BETTIOL, W., CAMARGO, O. A. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. p. 109-141.

QUINTANA, N. R. G. **Análise econômica da aplicação de biossólido na agricultura**. 2006. Dissertação de mestrado (Agronomia - Área de Concentração em Energia na Agricultura). Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2006.

SALVADOR, R. M. **Detecção e quantificação de *Enterovirus* em lodo de esgoto proveniente de estações de tratamento de esgoto com potencial uso na agricultura do Estado de São Paulo**. Dissertação (Mestrado – Ciências: Saúde Pública) – Universidade de São Paulo – Faculdade de Saúde Pública, São Paulo, 2011.

SAMPAIO, T. F. et al. Lodo de esgoto na recuperação de áreas degradadas: efeito nas características físicas do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, núm 36, p. 1637-1645, 2012.

STAFFORD, F.N. et al. Advances and challenges for the co-processing in Latin American cement industry. In: **International Congress of Science and Technology of Metallurgy and Materials - CONAMET**, 2014, Santa Fe, Argentina. Elsevier, 2015. p. 1. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211812815002163>>.
Acesso em: 27 jan 2017

TRIGUEIRO, R. M. **Uso de bio sólidos como substrato para produção de mudas de pinus e eucalipto**. Dissertação (Mestrado em Agronomia - área de Concentração em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2002. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/90649/trigueiro_rm_me_bofca.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 abr 2017.

VANÇO, J. E., MACEDO, L. S., TSUTIYA, M. T. ETE Franca: uma estação que além de tratar os esgotos, produz insumos agrícolas. In: Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, n. 17, 2000. Porto Alegre. **Resumo de trabalho técnico**. São Paulo: ABES – Trabalhos Técnicos, 2000.

ANEXO

Análise de sólidos - Lab Geoquímica		18 e 19/maio											
Nome amostra	Nº Cadinho	Peso cadinho	Peso amostra	Cad + Am	Pós-estufa	Massa água	Peso ST	Pós-mufla	Peso SF	% ST	% Umidade	% SF	% SV
Lodo I	4	40,5385	30,7445	71,313	41,216	30,0964	0,6775	40,8297	0,2912	2,20	97,89	42,98	57,02
Lodo III	11	28,777	34,0818	62,8568	29,5141	33,3427	0,7371	29,1433	0,3663	2,16	97,83	49,69	50,31
Lodo III	38	46,0774	30,8145	76,8919	46,7534	30,1385	0,676	46,3989	0,3215	2,19	97,81	47,56	52,44
SAP seco	XI	39,562	3,8504	43,4125	42,9361	0,4764	3,3741	40,9548	1,3928	87,63	12,37	41,28	58,72
SAP H2O	Grande	126,4915	17,2307	143,7222	128,801	15,3196	2,3095	127,4819	0,9904	87,84	88,91	42,88	57,12
		(água)	14,6016										
		(SAP pó)	2,6291										