

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS PARA A RECICLAGEM
DE EMBALAGENS CARTONADAS**

*STUDY AND DEVELOPMENT OF PROCESSES FOR THE RECYCLING OF
CARTONED PACKAGING*

José Fernando Marin Junior¹

Mayara Elizabeth Pereira¹

Roberta Martins da Costa Bianchi²

Universidade São Francisco – *Campus* Itatiba

marin.jose@live.com | mayara-elizabeth@hotmail.com | roberta.bianchi@usf.edu.br

¹Alunos do Curso de Engenharia Química

² Professora Orientadora

RESUMO. A embalagem cartonada, conhecida também como "embalagens longa vida", é uma embalagem asséptica para o envase e conservação de consumíveis. No cotidiano, seu uso é comum na indústria alimentícia. Tais embalagens são compostas por três componentes: papel, polietileno de baixa densidade e alumínio. Seu processo de reciclagem ocorre em duas etapas: primeiro a reciclagem do papel e posteriormente a reciclagem do composto de polietileno e alumínio. A primeira etapa de reciclagem foi realizada por meio de um hidrapulper, na qual são misturadas mecanicamente as embalagens com água no intuito de desagregar o papel da camada de plástico e alumínio. Para a separação do composto gerado de polietileno e alumínio foi desenvolvido um forno de indução eletromagnética, com o objetivo de gerar uma fonte de corrente elétrica no material condutor para que proporcionasse um aquecimento térmico, conhecido também por efeito Joule e submetesse a amostra de alumínio a altas temperaturas. Além disso, também foram feitos diversos testes em mufla, para efeito comparativo, entretanto, visando o estudo de funcionamento desses equipamentos, os diversos cálculos realizados para obtenção do rendimento teórico, e as análises de espectroscopia do infravermelho, constatou-se que o processo por indução eletromagnética é o mais eficiente como processo para a reciclagem visando em rentabilidade, contudo, os resultados apresentados na mufla também são consideráveis e não devem ser descartados.

PALAVRAS-CHAVE: Reciclagem, embalagem cartonada asséptica, hidrapulper, indução magnética.

ABSTRACT. The carton pack, also known as "long life packaging", is an aseptic carton for the packaging and storage of consumables. In everyday life, its use is common in the food industry. These packages are composed of three components: paper, low density polyethylene and aluminum. Its recycling process takes place in two stages: first the recycling of the paper and later the recycling of the compound of polyethylene and aluminum. The first stage of recycling was carried out by means of a hydropulper, in which the packages are mechanically mixed with water in order to disaggregate the paper from the layer of plastic and aluminum. For the separation of the generated polyethylene and aluminum compound, an electromagnetic induction furnace was developed, with the objective of generating a source of electric current in the conductive material to provide a thermal heating, also known as Joule effect, and to submit the aluminum sample at high temperatures. In addition, several muffle furnace tests were also performed for comparative purposes; however, in order to study the performance of those equipment, various calculations were performed to obtain the theoretical yield, and the infrared spectroscopy analyzes, it was verified that the process by

electromagnetic induction is the most efficient as a process for recycling aiming at profitability, however, the results presented in the muffle furnace are also considerable and should not be discarded.

KEYWORDS: Recycling, aseptic carton packaging, hydropulper, magnetic induction.

INTRODUÇÃO

O consumo desenfreado da população tem contribuído para a geração de resíduos sólidos urbanos (RSU), muitos são descartados em lugares inadequados causando sérios problemas ambientais e a saúde humana. Assim, é necessário a conscientização das pessoas com relação ao descarte desses resíduos e como alternativas possíveis estão o reaproveitamento e a reciclagem que contribuem para minimizar o esgotamento de bens e recursos energéticos.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), conforme a Lei nº 12.305/10 determina os instrumentos importantes para instituir a responsabilidade compartilhada dos geradores de resíduos aos serviços de manejo na logística reversa de embalagens pós-consumo. Contudo, dados de 2015 mostram que apenas 3% de todo o resíduo no Brasil é reciclado, onde 30% do lixo produzido poderiam ser reaproveitados. Além disso, apenas 18% dos municípios possuem coleta seletiva (ABRALATAS, 2017).

Desde 1960, a quantidade de resíduos coletados em todo o continente americano quase triplicou, chegando a 245 milhões de toneladas em 2005 (THE ECONOMIST, 2007). Segundo as estatísticas da União Europeia, a quantidade de lixo produzido na Europa Ocidental aumentou 23% entre 1995 e 2003. Como o volume de resíduos aumentou, o mesmo acontece com os esforços de reciclagem. Em 1980, a América reciclou apenas 9,6% de seu lixo municipal; hoje a taxa é de 32%. Uma tendência semelhante pode ser observada na Europa, onde alguns países, como Áustria e Holanda, reciclam mais de 60% dos seus resíduos urbanos (THE ECONOMIST, 2007).

As quantidades de resíduos orgânicos e inorgânicos crescem a cada ano nos aterros sanitários (SEGATO e SILVA, 2018), ocasionando assim a transmissão de doenças e impactos no meio ambiente. Com isso, gerando a necessidade de diminuição do acúmulo de lixo nessas áreas. A solução para este problema seria a reciclagem do produto pós-consumido, transformando-o em matéria prima novamente para utilização em um novo produto.

O leite, por exemplo, é um produto que geralmente é armazenado em embalagens cartonadas, compostas tipicamente de uma mistura de papel (75%), polietileno (20%) e alumínio (5%) (TETRA PAK, 2006), por isso pensar em meios de reciclagem é essencial. Assim, o objetivo desse trabalho é propor uma metodologia econômica e ambientalmente sustentável para reciclar embalagens cartonadas de modo a separar cada componente.

A fase inicial no procedimento para reciclagem das embalagens longa vida resulta no compósito de alumínio e polietileno. Antes, seu rumo seria somente para aterros ou incineração. Hoje, este compósito tem algumas formas de reutilização, como por exemplo, a utilização em telhas e pallets. Não obstante, apesar de tudo, ainda consideramos financeiramente viável realizar o isolamento do alumínio e o plástico.

A escolha do tema se justifica pela necessidade encontrada de concepção de novos meios de separação e reutilização dos componentes da embalagem, a fim de abrandar o atual estado de descarte. Ao identificar os métodos para reciclagem, tais ações exigem conhecimentos na área de Engenharia Química acerca dos procedimentos e equipamentos a serem empregados.

Este trabalho tem como objetivo descobrir formas que sejam financeiramente viáveis para a partição e reaproveitamento do compósito de plástico e alumínio, amplificando a relevância de sua utilização pelo mercado, além de estimular e desenvolver o tema da reciclagem das embalagens cartonadas, que por fim resultará na diminuição de seu indevido descarte.

REFERENCIAL TEÓRICO

Nos primórdios da história, o homem vivia praticamente sob as leis da natureza. Com o passar do tempo tentou entendê-las, controlá-las e, posteriormente, aplicá-las em seu benefício nessa trajetória. A transformação da matéria e, conseqüentemente, a produção de resíduos sempre estiveram presentes como parte das atividades humanas (BIDONE e POVINELLI, 1999).

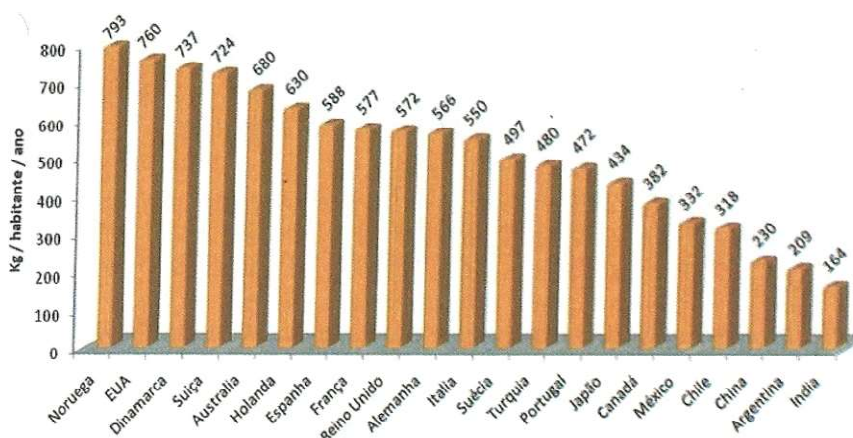
Os resíduos são gerados após a produção e utilização de qualquer material sólido, tanto em nível urbano, quanto industrial e até mesmo agrícola. Esse é um processo que acontece desde a Aurora do homem no planeta, quando utilizavam as espécies de animais, plantas e minerais que, devidamente transformados, eram utilizados como ferramentas, peças de vestuário e outros produtos que atendiam às suas necessidades básicas. Os resíduos, ou materiais excedentes, desses diversos processos de transformação eram simplesmente descartados no ambiente natural, uma vez que a população era pequena e gozava de ampla liberdade para se deslocar a novos locais. Um ambiente se encarregava de absorver os resíduos descartados pelo homem, sendo mínimos os problemas ambientais decorrentes do descarte (GIANETTI e ALMEIDA, 2006).

O crescimento da população mundial, aliado ao aumento da produção e do consumo de bens elaborados com os mais variados tipos de materiais, intensificou o descarte de resíduos, exigindo o gerenciamento e tratamento adequado para garantir que a coleta, separação, revalorização, transformação e a disposição final dos mesmos causassem menor impacto ambiental possível. Além disso, alguns países - e até mesmo grandes cidades - ainda enfrentam questões como a falta de espaço físico para a construção e expansão de locais apropriados para destinação final dos resíduos e a escassez de recursos financeiros para o equacionamento adequado do problema (SALLES, 2009).

Assim, especialmente nos grandes centros urbanos, as questões dos resíduos tornaram-se crucial, provocando a necessidade de uma reflexão mais séria em torno do tema. Em um passado não tão distante era gerado apenas algumas dezenas de quilogramas por habitante ao ano de resíduos. Em contrapartida, os países mais industrializados, tal como a Noruega, os Estados Unidos e a Dinamarca, atualmente são produzidos, respectivamente, 793, 760 e 737 quilogramas por habitante ao ano de resíduos sólidos urbanos (SILVA FILHO, 2009).

A Figura 1 ilustra a quantidade anual de resíduos sólidos per capita em vários países do mundo no período 2006 a 2007. O Brasil se coloca entre o México e o Canadá, com algo em torno de 359,4 quilogramas por habitante ao ano (SILVA FILHO, 2009).

Figura 1 – Quantidade anual de resíduos sólidos per capita em vários países do mundo no período 2006 a 2007 (Fonte: SILVA FILHO, 2009).



Segundo Abrelpe (2016), a geração de resíduos sólidos no Brasil em 2016 apresentou um total anual de quase 78,3 milhões de toneladas, toda via apenas 91% foi coletado o que indica que 7 milhões de toneladas de resíduos não foram coletados, tendo assim um destino impróprio.

A Figura 2 apresenta a geração per capita de RSU e a total no Brasil, na qual apresenta uma redução de 2 a 3% do ano de 2015 para 2016. Já na Figura 3 indica a disposição final de RSU, havendo assim um retrocesso de 2015 para 2016.

Figura 2 – Geração de RSU no Brasil (Fonte: ABRELPE, 2016).

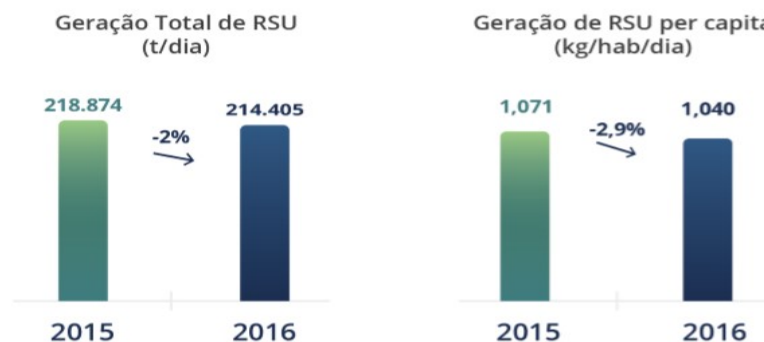
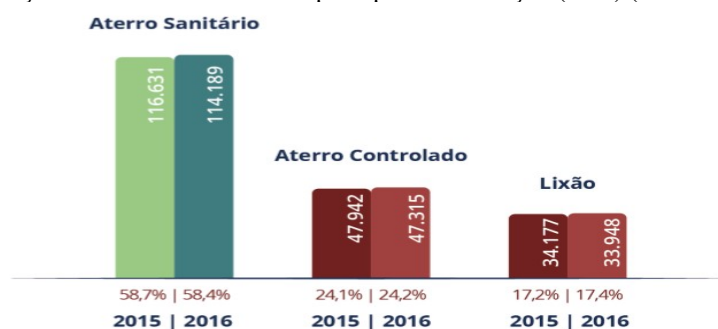


Figura 3 – Disposição final de RSU no Brasil por tipo de destinação (t/dia) (Fonte: ABRELPE, 2016).

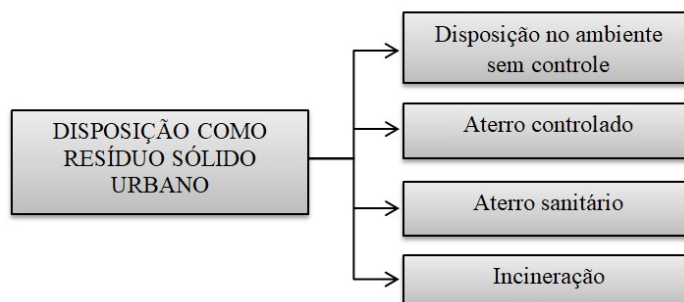


Embalagens cartonadas como resíduo sólido

As embalagens são um dos principais indicadores da participação dos resíduos sólidos, pois o consumidor ou a pessoa responsável pela sua geração muitas vezes desconhecem seu impacto ambiental ou até mesmo não tem a infraestrutura adequada para que seja disposto de outra forma.

Assim, a embalagem pode ter um dos quatro destinos, conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Fluxograma do destino de embalagens cartonadas (Fonte: Próprio autor).



Acomodação em ambiente sem controle

Acontece quando os resíduos são deixados na natureza sem nenhum tipo de controle, como quando temos o lixo jogado em regiões abertas, oceanos ou em lixões em áreas urbanas. Como indicado pelo IBGE (2010), em seu estudo sobre saneamento básico, 17,6% dos resíduos sólidos que são recolhidos no Brasil são deixados desta maneira, que totalizou em mais de 45 mil toneladas / dia em 2008 (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, 1995).

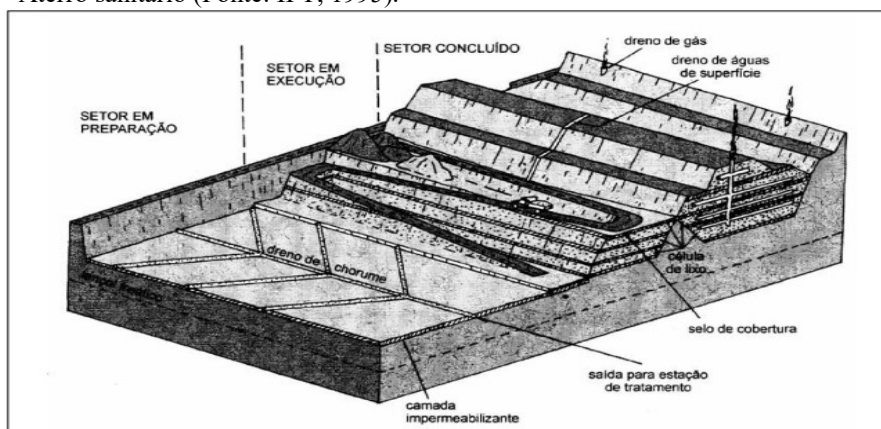
Acomodação em aterro controlado

Um aterro controlado é um meio-termo entre a acomodação em ambiente sem controle e a acomodação em aterro sanitário. Mesmo que não tenha cuidado com contaminações nas águas subterrâneas em regiões próximas e com os gases criados com a decomposição dos materiais, se tem apesar disso um lixo acumulado em um único lugar seguro com camadas de material inerte para limitar os perigos ao bem-estar e à segurança geral (IPT, 1995).

Acomodação em aterro sanitário

Um aterro sanitário é o método mais seguro para acomodar os resíduos. Em vista da elaboração de critérios e benchmarks de normas específicas, o aterro sanitário possibilita o controle de resíduos em células seguras com o objetivo final de controlar a contaminação ecológica e os perigos gerais à saúde (IPT, 1995).

Figura 5 – Aterro sanitário (Fonte: IPT, 1995).

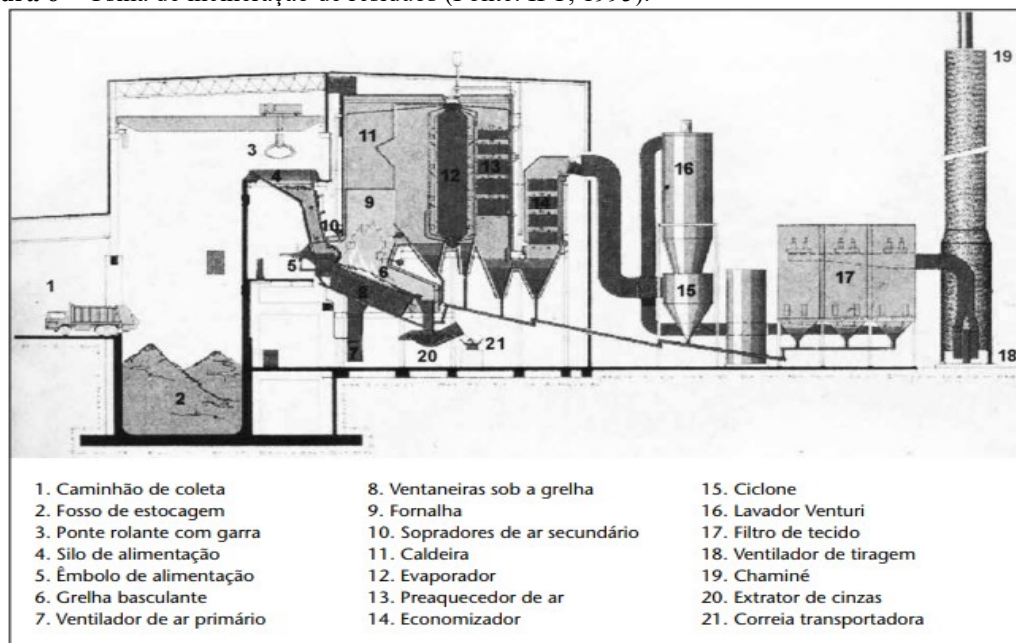


Incineração

A incineração de resíduos é definida como uma técnica de eliminação pela queima de compostos orgânicos e outras substâncias. O processo de incineração e outros métodos de eliminação de resíduos consistem em um tratamento térmico de alta temperatura. Pode ou não ser utilizada como recuperação de energia (MENEZES *et al.*, 2000).

No Brasil é utilizada para área da saúde, em virtude de sua patogenicidade. (MENEZES *et al.*, 2000).

Figura 6 – Usina de incineração de resíduos (Fonte: IPT, 1995).



Embalagem Cartonada Asséptica

A ascensão das embalagens cartonadas assépticas é vista como um grande avanço na área de embalagens, especialmente para a indústria alimentícia, uma vez que sua assepsia e barreira contra a entrada de luz e oxigênio proporcionava a preservação do alimento por tempos elevados, sem precisar de refrigeração ou aditivos.

A embalagem cartonada constitui em seis camadas de três materiais distintos. Indo de dentro para fora as camadas são: duas de polietileno, uma de alumínio, outro de polietileno, uma de papel e uma última de polietileno, sendo atribuído à elas uma função diferente, conforme Figura 7. Em quantidades, o papel representa 75% da embalagem, enquanto o polietileno representa 20% e o alumínio 5%. (NEVES, 1999).

Figura 7 – Estrutura das embalagens cartonadas assépticas (Fonte: TETRA PAK, 2006).



Tetra Pak

A Tetra Pak é a empresa líder mundial em soluções de processamento e embalagem de alimentos. A empresa fornece produtos seguros, inovadores e ambientalmente corretos que

diariamente atendem às necessidades de centenas de milhões de pessoas em mais de 160 países (TETRA PAK - Tetra Pak *in brief*, 2018).

No Brasil, o Centro de Inovação ao Cliente produz mais de 11 bilhões de embalagens cartonadas por ano (EMBALAGEMMARCA, 2017).

Reciclagem de embalagem cartonada asséptica

A indústria de embalagens desenvolveu novos produtos para dar conveniência ao consumidor e alguns deles não são feitos de um único material, tal como a embalagem cartonada na qual são consideradas de difícil reciclagem, cuja degradação é incerta, em consequência da agregação de diferentes materiais com propriedades físico-químicas díspares entre si, entretanto leva-se em consideração a degradação do Alumínio, que transcende a mais 100 anos (LANDIM et al, 2016).

Contudo, ao separarmos cada um dos materiais, além de sua possibilidade de reciclagem, podemos determinar o tempo de degradação na natureza. A celulose, por exemplo, é biodegradável e leva cerca de 6 meses para ser totalmente degradada na natureza. Já o plástico e o alumínio não são biodegradáveis e tem tempo elevado para total degradação na natureza. No caso do plástico, são mais de 100 anos, e do Alumínio, pode demorar de 100 a 500 anos, o que demonstra a importância de serem reciclados (LANDIM et al, 2016).

O papel pode ser separado do polietileno e alumínio no sistema tradicional utilizado há anos na fabricação de papel, porém, com algumas modificações para extrair este polietileno e alumínio. Diferente dos resíduos plásticos normais no processo de reciclagem de papel, o polietileno e o alumínio podem ser comercializados como matéria-prima e reciclados pela indústria de plásticos (NEVES *et al.*, 2015).

De acordo com dados levantados pelo Cempre, 21% foi o índice de reciclagem de embalagens longa-vida da Tetra Pak no Brasil no ano de 2015, o que totalizou em mais de 59 mil toneladas. Cada tonelada de embalagem cartonada reciclada gera em torno de 680 quilos de papel Kraft (CEMPRE, 2015).

Implicações ambientais têm impulsionado a coleta de embalagens pós-consumo e os consumidores estão preocupados em comprar produtos que possam estar de volta à cadeia de reciclagem. Existe uma enorme oportunidade para as empresas de reciclagem de papel obterem uma matéria-prima muito boa, com bom preço e sem resíduos, considerando que existe um novo mercado desenvolvido para a reciclagem de polietileno e alumínio (NEVES *et al.*, 2015).

Neves *et al.* (2015) realizaram um estudo de reciclagem de embalagens cartonadas da Tetra Pak de Monte Mor, no estado de São Paulo. Foram conduzidos vários testes industriais de acordo com o processo de produção de diversas fábricas. Os resultados mostraram valores de tração, rasgo, alongamento e arrebentamento dentro dos valores exigidos pelo mercado com sensível potencial de ganho nestas características através de um refino moderado.

Processo de reciclagem da fibra – desagregação

Um dos itens, e talvez o principal equipamento que constitui o laboratório de reciclagem é o desagregador de papel, equipamento conhecido comercialmente como hidrapulper, que basicamente desagrega o papel, formando uma pasta de celulose. Na Figura 8 pode se observar um exemplo de hidrapulper comercializado (HAHN *et al.*, 2010).

Figura 8 – Hidrapulper vendido comercialmente (Fonte: HAHN *et al.*, 2010).



O produto se define como uma máquina capaz de desagregar totalmente e separar todas as fibras contidas no papel, funcionando com o mesmo princípio de um liquidificador, com introdução de água para auxiliar a transformação do papel em uma polpa homogênea (HAHN *et al.*, 2010).

A desagregação de embalagens cartonadas é possível em alguns tipos de procedimentos. As principais plantas implantadas utilizavam o desagregamento através do *drum pulper* (ou "desmonte de tambor"), onde se insere as embalagens de forma contínua nos compartimentos e o mosto é removido constantemente. Neste tipo de processo, o polietileno e o alumínio são retirados apenas ao fim do sistema. Contudo, um espaço e investimento maiores são requeridos quando comparado ao hidrapulper (MASSUCATO *et al.*, 2012).

No Brasil, existem algumas organizações que utilizam a embalagem cartonada como matéria-prima para a produção de papel. A Figura 9 demonstra as estruturas de desagregação do hidrapulper batelada (MASSUCATO *et al.*, 2012).

Figura 9 – Estruturas de desagregação no hidrapulper batelada (Fonte: MASSUCATO *et al.*, 2012).



Reciclagem do Alumínio e Polietileno

Pirólise

A pirólise é uma decomposição química que é realizada através do aquecimento de compostos orgânicos sem oxigênio ou halogênio que, por altas temperaturas (200-900 °C), ocorre uma quebra de ligação onde moléculas grandes são forçadas a moléculas menores. Alterações na síntese química podem ser examinadas experimentalmente. Nenhuma reação reversa ocorre. Pode ser realizado na coexistência de vapor (MOHAN *et al.*, 2006).

Na análise química, ele é usado para identificação dividindo substâncias de composição complexa em moléculas simples. Exemplos disso são a cromatografia gasosa de pirólise e semelhantes (MESSING *et al.*, 1993).

Industrialmente, é usado para converter uma única substância em outra substância. Por exemplo, o 1,2-dicloroetano é pirolisado para produzir cloreto de vinilo. Esta é uma matéria-prima para cloreto de polivinila. Também é usado para converter biomassa e resíduos em

substâncias mais benéficas ou menos perigosas (gás de síntese, etc.). A pirólise sob condições severas, onde somente o carbono é obtido, é chamada de carbonização (YANG *et al.*, 2007).

A etimologia de pirólise é a síntese do morfema derivado da Grécia, *piro* (fogo) e *lise* (decomposição) (YANG *et al.*, 2007).

Plasma

O plasma é o estado ionizado da matéria, conformado por um gás quase neutro composto por partículas carregadas e neutras, que exibem um comportamento coletivo, sendo ela a forma mais abundante de matéria no universo. É formado sempre que a matéria comum é aquecida a mais de 5.000 °C, o que resulta em gases ou fluidos eletricamente carregados. Eles são profundamente influenciados pelas interações elétricas dos íons e elétrons pela presença de um campo magnético (LEAL-QUIRÓS, 2004).

O plasma produzido com descarga elétrica em corrente contínua é tomado de um tubo de descarga elétrica que, aumentando a tensão enquanto mede a corrente seguinte através da descarga, resulta em uma alta curva não-linear de corrente de tensão. Os três principais regimes de tubos de descargas elétricas de baixa pressão industrialmente importantes são a descarga escura, a descarga de incandescência e a descarga do arco atmosférica (LEAL-QUIRÓS, 2004).

Também conhecido como plasma químico ou industrial, é utilizado em reatores, utilizando eletricidade nas tochas de plasma (FAPESP, 2005). A tocha de plasma, por sua vez, é um dispositivo que converte esta eletricidade em calor, para ser transportado pelo gás, fazendo com que seja levado ao estado de plasma e ter atuação expressiva na reação (FEUP, 2018).

Indução magnética

Os fornos de indução ao receber uma corrente elétrica, geram através de suas bobinas um campo magnético, que ao entrar em contato com o alumínio das embalagens cartonadas são geradas “Correntes de Eddy” que devido à resistência do material, causam aquecimento por efeito Joule (SANERIP, 2006).

O alumínio aquece e começa a transmitir calor para o resto dos materiais (polietileno e resíduos de papel), assim sua separação ocorre pelo ponto de fusão do alumínio ser superior aos demais, ou seja, enquanto o alumínio se funde os resíduos de papel se carbonizam e o plástico é liberado através de gás. Para os gases gerados, é possível reaproveitá-los através de energia elétrica, ou com um processo de destilação obter a parafina (SANERIP, 2006).

METODOLOGIA

Trata-se do detalhamento dos materiais e métodos a serem utilizados para a concepção dos protótipos na qual foram desenvolvidos para separar os componentes das embalagens longa vida.

Construção do Protótipo - Hidrapulper

O hidrapulper foi desenvolvido em escala laboratorial de baixo custo a fim de promover a desagregação do papel da embalagem longa vida.

Para a construção do desagregador, utilizou-se um liquidificador comum, entretanto retirou-se a hélice que vem no copo do liquidificador, e trocou-se por uma hélice adaptada conforme de modo que não cortasse a embalagem.

Construção do Protótipo – Forno de Indução Magnética

O forno de indução magnético (NARDI, 2014) foi desenvolvido em escala laboratorial de baixo custo com o intuito de separar o composto de alumínio e plástico que sobraram do processo de hidrapulper.

Primeiramente fez-se a base do forno com um pedaço de MDF 20 cm x 20 cm, depois cortaram-se quatros pedaços do fio de cobre rígido com secção de 4 mm², sendo dois de 15 cm e dois de 38 cm de comprimento.

Utilizaram-se os dois pedaços de fio cortados de 38 cm para construir uma bobina com 3 cm de diâmetro, onde para cada fio deixou-se um pedaço de 5 cm para fora e começou a enrolar em modo espiral. Foi enrolado em 3 voltas e dobraram-se os terminais de modo que as duas extremidades da bobina ficassem paralelas, depois repetiu o mesmo processo para o segundo fio a fim de dar continuação a bobina, obtendo assim uma bobina final de 6 espiras com tape central, para junta-las foi utilizado solda de estanho.

Em seguida foram usados cinco capacitores de 6,8 µF x 250 V e unidos com dupla face, depois foi soldado cada terminal dos capacitores do lado direito em um pedaço de fio de 15 cm de modo que deixasse 5 cm na parte da frente, o mesmo processo foi repetido do lado esquerdo, para que garantisse uma associação em paralelo dos capacitores no que resultaria na soma das capacitâncias. Após isso, uniu-se com estanho os terminais de 5 cm que foram deixados dos capacitores com as duas extremidades da bobina de 6 espiras. As outras duas extremidades do fio foram estanhadas e reservadas.

Foram utilizados dois MOSFETs IRFZ44N e acoplados cada um em dissipadores de calor com o auxílio de uma chave 1/8" em seguida fizeram uns ajustes em cada extremidade, sendo na sua primeira extremidade (*gate*) foi cortada ao meio, no meio (*drain*) foi mantida reta e a terceira (*source*) dobrada em 90° graus para cima. Com isso, foi soldada as duas extremidades que haviam sido estanhadas com o terminal *drain* de cada MOSFET.

Cortou-se outro pedaço de fio de cobre rígido com secção de 4 mm², que foi utilizado para juntar os terminais *sources* dos MOSFETs, que seriam a terceira ponta dobrada em 90° graus, na qual se tornou o polo negativo do sistema.

Utilizou-se resistores de 1K para soldar entre os terminais *gates* e *source* de cada MOSFET.

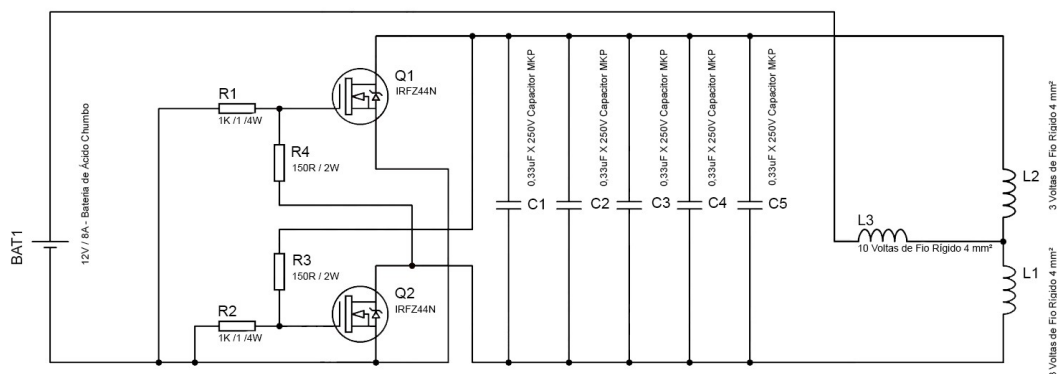
Com o resistor de 150R / 3W foi estanhado as duas extremidades para facilitar a solda, foi estanhado também as duas barras de cobres ligados ao *drain* dos MOSFETs, assim posteriormente soldou-se uma extremidade do resistor entre a barra ligado ao *drain* de um MOSFET e a outra extremidade no *gate* do outro MOSFET, repetido o mesmo processo para o outro resistor a fim de ficar um circuito cruzado.

Estanhou-se o terminal que liga o *source* e soldou-se o fio negativo que posteriormente será ligado na bateria.

Cortou-se um pedaço de fio de cobre rígido com secção de 4 mm² de 55 cm de comprimento para fazer a segunda bobina de 1 cm de diâmetro, foi utilizado uma caneta permanente do modelo *pilot* para usar como molde, assim enrolou-se 10 vezes deixando 5 cm de fio para fora. Após construção da bobina posicionou-se de modo a ser soldada entre o tape central da bobina de 6 espiras e seu polo positivo. Em seguida pegou-se um pedaço de fio 0,25 mm² de 9 cm e soldou-se no outro terminal da bobina de 10 espiras, para que assim fosse ligado no polo positivo da bateria.

A Figura 10 ilustra o circuito montado acima:

Figura 10 – Circuito de como fazer um aquecedor indutivo (Fonte: NARDI, 2018).



Desagregação do papel – Processo do Hidrapulper

Para desagregar o papel contido nas embalagens cartonadas, inicialmente, as caixas de leite foram picadas em cubos de 5 cm x 5 cm. Foram alocadas no copo do liquidificador 1 caixa picada (28g) para 1L de água e após 10 minutos de agitação no hidrapulper, retirou-se com o auxílio de uma pinça o composto de PEBD mais alumínio além da primeira camada de plástico que estava agregada ao papel para se obter a polpa de água e papel,

Acoplaram-se duas telas uma em cima da outra em uma forma de alumínio, para que pudesse jogar aos poucos a polpa de água e papel, no intuito de separa-los e ficarem retos. Depois para retirar o excesso de água foi colocado um pano em cima e com movimentos laterais fez-se com que a água excedente saísse. Esses movimentos foram repetidos 3 vezes, até que o papel ficasse o mais seco possível. Foi colocada a camada de papel formado entre duas madeiras, após total secagem retirou-se e obteve-se o papel reciclado. Aplicou-se o balanço de massa e verificou-se o rendimento obtido.

Separação do Alumínio e Plástico I - Forno Mufla

Para realizar a separação na Mufla, primeiramente pesaram-se várias amostras do resíduo do composto de polietileno e alumínio, colocaram-se 3 amostras em um cadinho de cerâmica de aproximadamente 15 cm x 10 cm, e posteriormente inserido dentro do forno para realizar a separação dos componentes. As temperaturas do forno foram variadas em 150 °C, 200 °C, 250 °C, 300 °C e 400 °C em tempos de 30 minutos, para cada amostragem. Após retirarem as amostras, seu peso foi anotado e foram observados os resultados para o melhor rendimento.

Separação do Alumínio e Plástico II - Forno de Indução Magnética

A separação do alumínio e plástico no forno de indução, se se iniciou, pesando uma amostra do resíduo do composto de alumínio e polietileno gerado no processo de reciclagem via hidrapulper e depois se colocou no cilindro de latão que estava alocado no meio da bobina de aquecimento do forno. Realizaram testes em temperaturas diferentes de 150 °C, 200 °C, 250 °C, 300 °C e 400 °C para observar a separação dos dois componentes. Após os testes realizados pesaram-se o material formado do alumínio e analisaram-se os dados.

TRABALHO DE GRADUAÇÃO – ENGENHARIAS

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Montagem dos Protótipos

Ao longo da montagem e testes do hidrapulper, notou-se certa dificuldade em achar a potência e hélice adequada para que conseguisse a total separação do papel sem rasgar a embalagem. No fim ao invés de usar um propulsor marinho de 6 pás, foi adaptado uma “hélice” reta, conforme mostra Figura 11.

Figura 11 – Hélice reta (Fonte: Próprio autor).



Após a montagem do Forno de Indução realizaram-se alguns testes e necessitou utilizar um cano de latão no interior da bobina conforme Figura 12, para que pudesse ocorrer a separação do plástico e alumínio, pois sem o mesmo a bobina de cobre não conseguiria induzir o alumínio por ser baixo condutor e ter pouca massa.

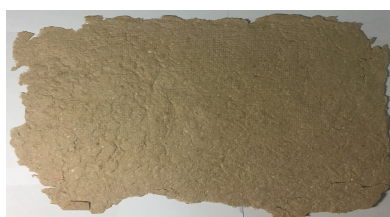
Figura 12 – Cilindro de latão (Fonte: Próprio autor).

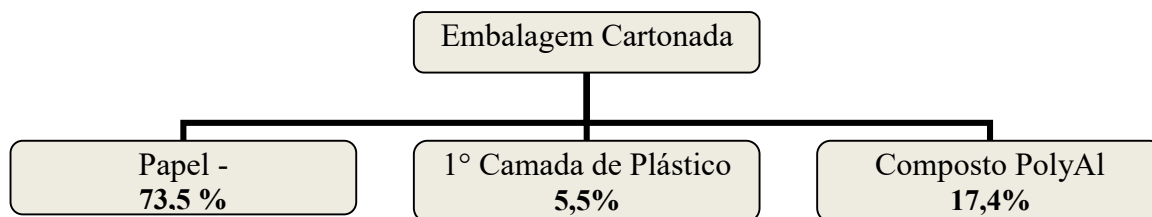


Obtenção do papel reciclado

Em um processo de desagregação do papel por hidrapulper se obtém 75% de papel, e 25% de um composto de PEBD e alumínio (PolyAl) sendo 5% alumínio e 20% PEBD, tendo uma perda em média de 2% (NEVES, 1999). Após vários ciclos de desagregação realizados no hidrapulper construído obteve-se a separação de 73,5% de papel conforme Figura 13, e uma eficiência no processo de 96,4%. Conforme o Fluxograma, houve uma perda média de 1,5% de papel e 2,1% de PEBD e alumínio, e isso ocorreu pois a hélice adaptada estava enroscando o PolyAl e por ser um processo manual ocorrer a perda de materiais no momento da separação dos componentes ou até mesmo na fabricação da folha de papel reciclado.

Figura 13 – Papel seco após desagregação no processo de hidrapulper (Fonte: Próprio Autor).



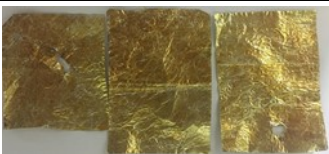


Separação do Plástico e Alumínio

Forno Mufla

Foram realizados testes em 5 temperaturas diferentes cerca de 30 min cada, para que se observasse o comportamento de cada amostra e sua respectiva taxa de evaporação, conforme mostra na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados obtidos, referente aos testes no forno Mufla (Fonte: Próprio Autor).

Temperatura (°C)	Massa inicial (g)	Amostra após 30 min	Massa Final (g)	Material evaporado (%)	Média de Material evaporado (%)
150	0,2792		0,2766	0,9%	1,2%
	0,2877		0,2844	1,1%	
	0,2320		0,2283	1,6%	
200	0,2610		0,224	14,2%	16,5%
	0,2874		0,2409	16,2%	
	0,3161		0,2556	19,1%	
250	0,2214		0,1688	23,8%	25,7%
	0,1384		0,1021	26,2%	
	0,2729		0,1985	27,3%	
300	0,2864		0,0829	71,1 %	68,8 %
	0,2725		0,0945	65,3 %	
	0,2729		0,0816	70,1 %	
400	0,2282		0,0628	72,5%	73,0%
	0,2867		0,0760	73,5%	
	0,2768		0,0748	73,0%	

Observa-se na Tabela 1 que as amostras conforme aumento da temperatura sua taxa de evaporação também foi aumentando.

As amostras expostas a 150 °C tiveram evaporação média de apenas 1,2% de polietileno, entretanto foi possível notar que o polietileno começou a derreter e constatou-se uma diferença entre a amostra inicial, onde foi notado um aspecto mais brilhante, isso ocorreu, pois, mesmo o polietileno de baixa densidade apresentar uma t_m (temperatura de fusão cristalina) de 100 à 125°C, ela pode variar através do seu grau de cristalinidade que é justificado pelas suas moléculas apresentarem elevadas ramificações tanto em cadeia curta

quanto em cadeia longa (CALIANI, 2005), ou seja, quanto maior sua cristalinidade maior seu ponto de fusão.

Já nas amostras expostas a 200 °C e 250 °C, apresentaram uma taxa de evaporação de 16,5% e 25,7% respectivamente, foi perceptível a mudança de coloração de incolor para amarela e um aspecto mais pegajoso, isso ocorre quando o PEBD é submetido a altas temperaturas e pelo fato de ter a presença de oxigênio, o que acaba levando à combustão parcial (GONÇALVES, 2007).

A Figura 14 apresenta os espectros referentes às análises de infravermelho (IR) do polímero PEBD antes (linha vermelha) e após o Tratamento térmico (linha verde e preta) na mufla. O PEBD por ter uma longa cadeia e ramificações carbônicas (CH₂) apresenta um espectro relativamente simples e com regiões bem definidas entre 2914 a 720 cm⁻¹. Os picos em 2914,44 e 2848,86 cm⁻¹ correspondem ao estiramento assimétrico e simétrico respectivamente, da ligação C-H. A Tabela 3 apresenta a atribuição acerca dos modos vibracionais de todos os picos. Observa-se para as amostras submetidas ao tratamento térmico a 300 °C (linha verde) e 400 °C (linha preta) a remoção total dos picos característicos indicando a evaporação e/ou degradação do polímero (TAKASHI, 2016).

Figura 14 – Análise infravermelho das amostras retiradas da Mufla e do PEBD puro (Fonte: Próprio Autor).

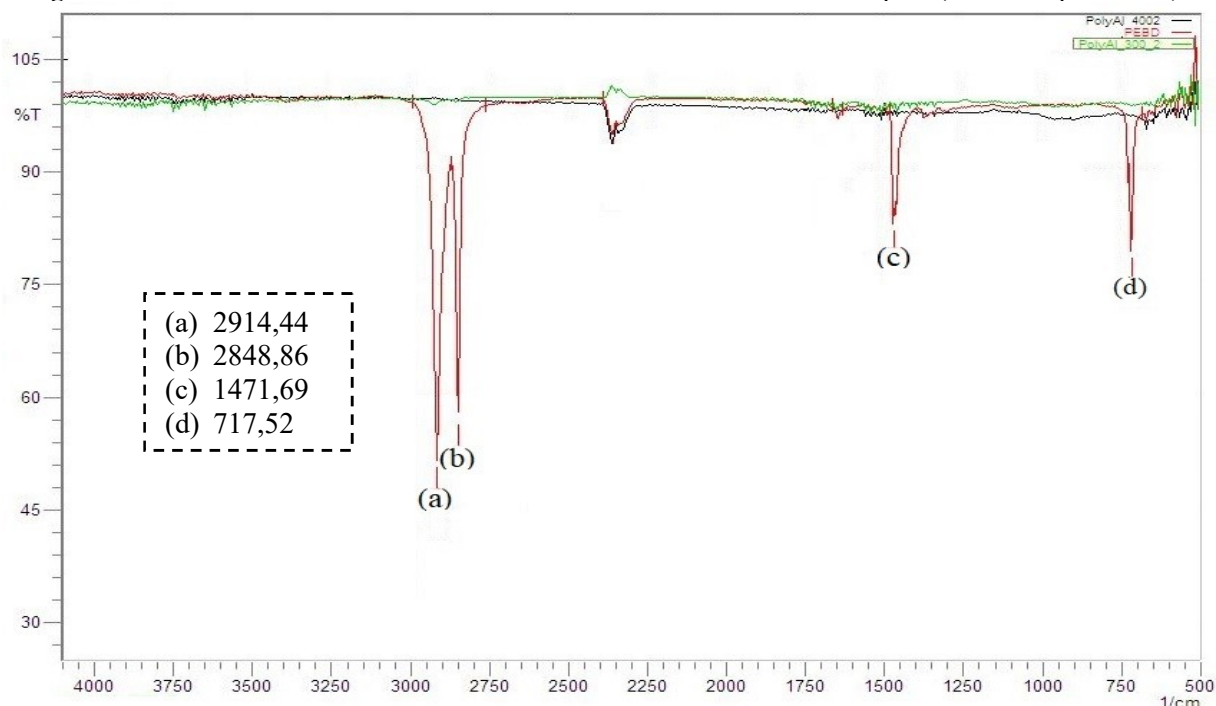


Tabela 3 – Número de onda e o modo vibracional. (Fonte: TAKASHI).

Frequência (cm-1)	Modo Vibracional
2914,44	Estiramento assimétrico, C-H
2848,86	Estiramento simétrico, C-H
1471,69	Deformação angular simétrica (scissoring), CH ₂
717,52	Deformação angular fora do plano de flexão, C-H

Forno Indução Magnética

As amostras foram tratadas termicamente utilizando um forno de indução magnética nas mesmas condições de temperatura realizadas na mufla, porém, com variação de tempo de 2 minutos. No forno de indução não havia um controlador de temperatura e o sistema chegava a 400 °C rapidamente. Assim, houve a necessidade do controle manual, ou seja, o sistema era desligado quando a atingia a temperatura desejada. Os testes foram realizados a fim de comparar os métodos de tratamento térmico e verificar qual apresenta a melhor resposta com relação à separação dos materiais. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos por meio do forno de indução.

Tabela 3 – Resultados obtidos referente aos testes no forno de indução magnética (Fonte: Próprio Autor).

Temperatura (°C)	Massa inicial (g)	Amostra após 2 min	Massa Final (g)	Material evaporado (%)	Média de Material evaporado (%)
150	0,1073		0,1025	4,5%	4,9%
	0,1241		0,1173	5,5%	
	0,1271		0,1210	4,8%	
200	0,1114		0,0954	14,4%	11,9%
	0,1337		0,1237	7,5%	
	0,1324		0,1142	13,7%	
250	0,1372		0,1280	6,7%	21,9%
	0,1000		0,0591	40,9%	
	0,0980		0,0804	18,0%	
300	0,0830		0,0430	48,2%	46,4%
	0,0924		0,0472	48,9%	
	0,0986		0,0570	42,2%	
400	0,1948		0,0583	70,1%	65,5%
	0,1383		0,0663	52,1%	
	0,0756		0,0194	74,3%	

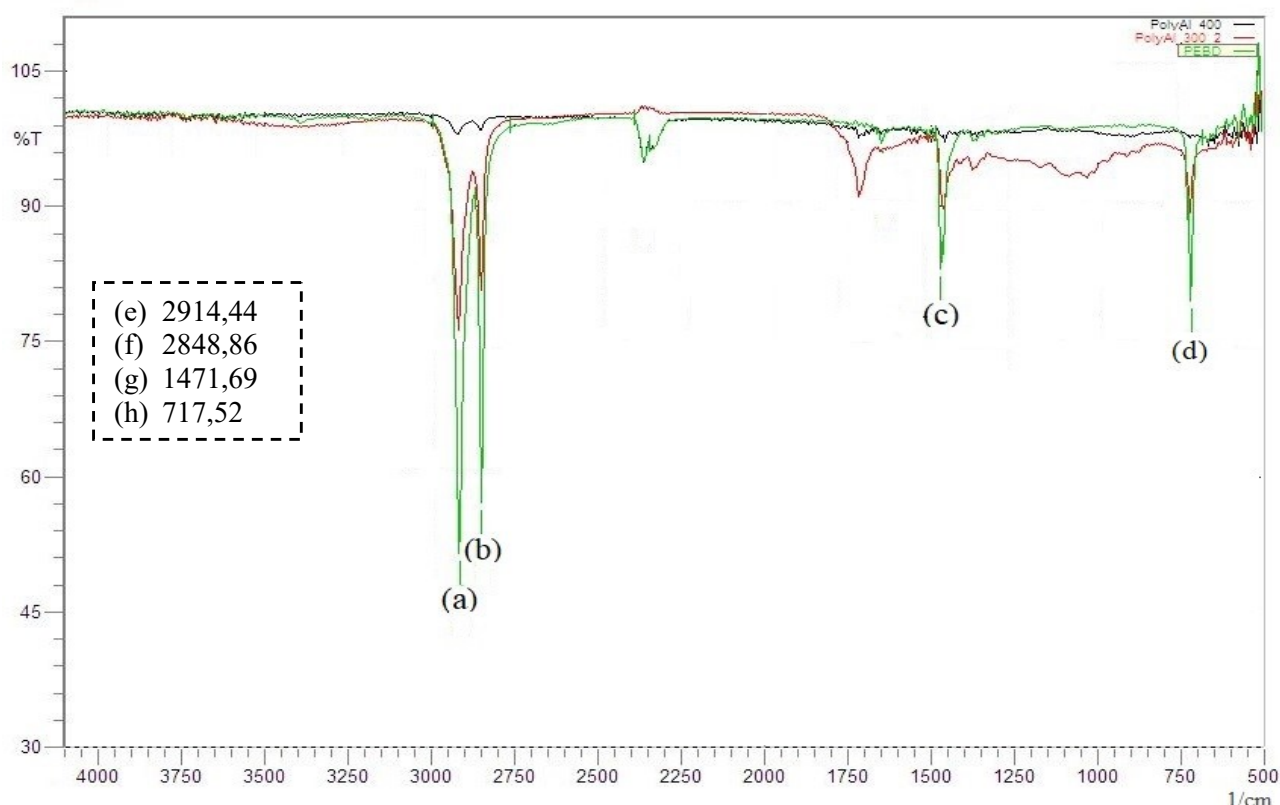
Em relação aos dados apresentados da Mufla, analisou-se que os resultados foram próximos, entretanto nas temperaturas de 200 °C e 250 °C, o alumínio apresentou apenas uma leve coloração amarelada.

A Figura 15 apresenta os espectros referentes às análises de infravermelho (IR) do polímero PEBD antes (linha verde) e após o Tratamento térmico (linha vermelha 300 °C e preta 400 °C) no forno de indução. Observa-se para a amostra submetida a 300 °C a presença dos picos característicos do PEBD, porém, com menor intensidade, esse fato sugere que o polímero da amostra não foi totalmente evaporado e/ou degradado. No entanto, a amostra submetida a 400 °C, os picos desapareceram indicando a remoção do polímero.

A Figura 15 mostra na curva verde o espectro do padrão PEBD puro com suas bandas de absorção características assinaladas, comparando com o espectro de IR das amostras de 300 °C e 400°C curvas vermelha e preta respectivamente, na curva vermelha observa-se que houve a degradação do polímero, porém verificou-se ainda a presença dele por ainda estar evidente nos picos característico do padrão puro. Já na amostra de 400 °C teve quase 100 % de remoção, tendo uma pequena incidência nos picos de 2914,44 cm^{-1} e 2848,86 cm^{-1} , que é característico de ligações C-H (ASENSIO et al., 2009).

Por mais que o forno de indução teve menor taxa de evaporação pode-se observar que os resultados foram significativos.

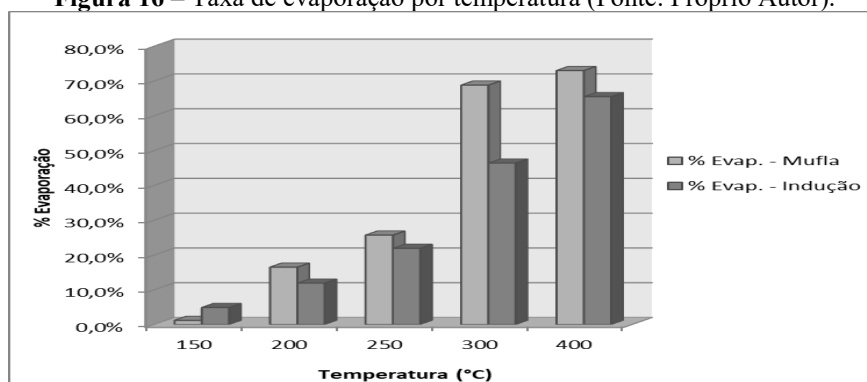
Figura 15 – Análise infravermelho das amostras retiradas do forno de indução magnética e do PEBD puro (Fonte: Próprio Autor).



Vale ressaltar que a amostra foi exposta apenas em 2 minutos, ou seja, mostrando ser eficaz em um tempo menor que o outro método.

Com base nos dois métodos utilizados pode-se observar na Figura 16 a taxa de evaporação obtida para cada um.

Figura 16 – Taxa de evaporação por temperatura (Fonte: Próprio Autor).



Para a obtenção do valor em reais da energia gasta de cada equipamento, primeiramente utilizou-se a Equação 1, na qual calculou-se a potência dissipada.

$$P = U \cdot i \quad (1)$$

Sendo:

P = potência dissipada (W=J/s);

U = diferença de potencial (ddp - Volts);

i = intensidade da corrente elétrica (A).

Com isso, multiplicou-se pelo tempo gasto no manuseio de cada forno, e então se converteram os resultados para kW/h.kg. Para determinar o consumo de uso do sistema do valor gasto por Kg de PolyAl em cada forno, multiplicou-se pelo valor de R\$ 0,578 kW/h disponível na fatura referente ao mês de setembro da empresa CPFL, fornecedora da energia utilizada na região dos testes. Os resultados podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4 – Comparativo de energia gasta e sua produtividade.

	Tempo (s)	Peso médio (kg)	Tensão x Corrente (J.s)	kW/h.kg	R\$ por Kg
<i>Mufla</i>	480	0,00079	1276,00	214,14	124,00
<i>Indução</i>	120	0,00012	171,45	48,76	28,20

A energia gasta em kW/h para cada kg de PolyAl no forno de indução é 22,8% do valor gasto pela mufla. Com isso, em termos de produtividade, o forno de indução magnética é o mais rentável.

A Tabela 5 apresenta uma comparação dos equipamentos referente aos diferentes métodos de separação PolyAl. A partir das informações apresentadas pode-se observar que além do plasma existem outros métodos de separação mais viáveis e rentáveis, sendo o forno de indução magnética a melhor opção e em seguida o Forno Mufla.

Tabela 5 – Comparativo entre os métodos de separação do PolyAl.

Equipamentos	Nome comercial	Tipo de sistema	Preço	Temperatura máxima (°C)
Mufla 	Forno Mufla Vantec	Isolamento térmico de baixa densidade	R\$ 17800,00	1200
Plasma 	Vacuum Hot-Pressing Sintering Furnace Vacuum Spark Plasma Sintering Furnace	Transformação de energia eléctrica em calor transportado por um gás	US\$ 150000,00	50000
Indução 	Unidades de Potência VIP-I Plus	Indução eletromagnética	R\$ 60000,00	1400

CONCLUSÕES

O desenvolvimento do presente trabalho possibilitou uma análise dos processos economicamente viáveis para a reciclagem do plástico e alumínio. Além disso, também permitiu o desenvolvimento de um protótipo de um forno de indução eletromagnética para obter dados mais consistentes sobre as etapas do processo, comportamento dos materiais e efetividade.

De um modo geral, os métodos propostos visaram o aumento no incentivo da reciclagem dos componentes das embalagens cartonadas, bem como a ampliação do interesse pelo mercado, gerando assim menor impacto ambiental.

Ao realizar testes em ambiente fechado, verificou-se que, em comparativo da mufla com o forno de indução eletromagnética, nas temperaturas de 200 °C, 250 °C, 300 °C e 400 °C a mufla demonstrou ser mais eficiente em termos de taxa de evaporação, entretanto o forno de indução além de apresentar valores próximos também é mais economicamente viável, pois a energia gasta é menor, o que poderia justificar sua aquisição.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus por ter nos fortalecido para superar as dificuldades e pela saúde para que conseguíssemos alcançar esta fase tão importante de nossas vidas, à Universidade São Francisco por ceder todo o espaço para testes, seja nos laboratórios de química, elétrica ou de tratamentos térmicos, aos professores Roberta Martins da Costa Bianchi, Elaine Cristina Marques, João Alex Franciscan Vaz, Monica Tais Siqueira D' Amelio Felipe e Filipe Alves Coelho, além dos técnicos José Antônio Batista e João Roberto Roson pela atenção, orientação e paciência que nos ajudaram a tornar possível a realização deste trabalho de graduação, e às nossas famílias e amigos que não desistiram de nós e estiveram ao nosso lado para oferecer todo apoio que precisamos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRALATAS. **A reciclagem no Brasil em números**. 2017. Disponível em: <<http://www.abralatas.org.br/a-reciclagem-do-brasil-em-numeros/>>. Acesso em 27 março de 2018.

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. 2016. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2016.pdf>> Acesso em 12 maio 2018.

ASENSIO, R.C., Moya, M.S.A., de la Roja, J.M., Gómez, M., 2009. **Analytical characterization of polymers used in conservation and restoration by ATR-FTIR spectroscopy**. Anal. Bioanal. Chem. 395 (7), 2081–2096.

BIDONE, F. R. A.; POVINELLI, J. **Conceitos Básicos De Resíduos Sólidos**. São Carlos. Editora EESC/USP. 1999, 109 p.

CALIANI, E., **Modelagem e simulação de um reator autoclave para a produção de polietileno de baixa densidade (PEBD)**. 2005. 19 p. Dissertação (Mestrado em desenvolvimento de processos químicos) - Faculdade de Engenharia Química, Unicamp.

CEMPRE - **Embalagens Longa Vida**. Disponível em <<http://cempre.org.br/artigo-publicacao/ficha-tecnica/id/9/embalagens-longa-vida>>. Acesso em 02 de maio de 2018

EMBALAGEMMARCA. **Tetra Pak inaugura Centro de Inovação ao Cliente no Brasil**. Disponível em: <<https://www.embalagemmarca.com.br/2017/07/tetra-pak-inaugura-centro-de-inovacao-ao-cliente-no-brasil/>>. Acesso em 18 de mar. de 2018.

FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. **Plasma Pirólise**. Disponível em: <<https://web.fe.up.pt/~jotace/gtresiduos/plasmapirolise.htm>>. Acesso em 14 de novembro de 2018.

GIANETTI, B. F.; ALMEIDA, C. M. B. V.; **Ecologia Industrial**. São Paulo Edgard Blucher. 2006. 109 p.

GONÇALVES C. K., **Pirólise e combustão de resíduos plásticos**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Engenharia de materiais, USP.

HAHN, A. F.; CAVALHEIRO, A. Z.; SANTANA, F. E. **Projeto Conceitual de um Desagregador para Reciclagem de Papel**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - IF-SC. 2010.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFICA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**, Rio de Janeiro, 2010.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). **Lixo Municipal: manual de gerenciamento integrado**. São Paulo: IPT/CEMPRE, 1995.

LANDIM A. P. M.; BERNARDO C. O.; MARTINS M. R. F.; SANTOS M. B.; MELO N. R.; **Sustentabilidade quanto às embalagens de alimentos no Brasil**. Polímeros. vol.26. UFRJ, 2016.

LEAL-QUIRÓS, E.; **Plasma Processing of Municipal Solid Waste**. Scientific Research Department. Polytechnic University of Puerto Rico. Brazilian Journal of Physics, vol. 34, no. 4B, December 2004.

MASSUCATO, F.; NEVES, F.; MERENDINO, E.; PIVA, M.; **Comparação de processos de desagregação de embalagens cartonadas e seus reflexos nas propriedades mecânicas de polpa celulósica** [Conference] // 45 Pulp and Paper International Congress. - São Paulo: ABTCP, 2012. - Vols. Proceeding - Mídia CD.

MENEZES, R. A. A.; GERLACH, J. L.; MENEZES, M. A.; **Estágio Atual Da Incineração No Brasil**. ABLP – Associação Brasileira de Limpeza Pública. VII Seminário Nacional de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública. Curitiba, 2000.

MESSING, G. H.; ZHANG, S. C.; JAYANTHI, G. V.; **Ceramic powder synthesis by spray pyrolysis**. Journal of the American Ceramic Society. Wiley Online Library, 1993.

MOHAN, D.; PITTMAN, C. U.; STEELE, P. H.; **Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review**. ACS Publications, 2006.

NARDI M. **Forno de indução magnética.** Disponível em: <<https://www.marlonnardi.com/p/como-fazer-um-aquecedor-indutivo-facil.html>>. Acesso em 01 de ago. de 2018.

NEVES, F.L., **Reciclagem de embalagens cartonadas Tetra Pak.** O Papel, n. 2, 1999.

NEVES, F. L.; MERENDINO, E. M.; PIVA, M.; HONORATO, R.; **Aseptic Carton Packages: Recycling Review - Tetra Pak Brazil**, 2015.

SALLES, A. C. N.; **Emissões De Gases Do Efeito Estufa Dos Dormentes De Ferrovia De Madeira Natural E De Madeira Plástica No Brasil E Na Alemanha Com Base Nos Seus Ciclos De Vida.** 2009. 201 p. Tese (Doutorado Em Planejamento Energético).

SANERIP, W. J.; **Processo de separação de alumínio e similares de embalagens cartonadas.** Unicamp, 2006.

SEGATO, L. M.; SILVA, C. L. - **Caracterização Do Chorume Do Aterro Sanitário De Bauru.** XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. UNESP, 2018.

SILVA FILHO, C. R. V.; **Panorama Dos Resíduos Sólidos No Brasil E No Mundo in: CONFERÊNCIA SOBRE RECICLAGEM DE RESÍDUOS: A Compatibilidade Dos Modelos Mecânicos Energéticos.** 2009. São Paulo.

TAKASHI, Y. - **Espectroscopia de infravermelho 30 palestras.** Química fácil 30 séries de palestras. Asakura Shoten. 2016.

TETRA PAK. **Relatório Socioambiental 2004-2005.** São Paulo, 2006.

TETRA PAK. **Tetra Pak in brief.** Disponível em: <<https://www.tetrapak.com/about/tetra-pak-in-brief>>. Acesso em 18 de mar. de 2018.

THE ECONOMIST. **The Truth About Recycling.** 2007. Disponível em: <<https://www.economist.com/node/9249262>>. Acesso em 18 mar. de 2018.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H.; ZHENG, C.; **Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis.** Elsevier, 2007.