

UNIVERSIDADE FEDERAL DO TRIÂNGULO MINEIRO

MARIA FLÁVIA BORGES DA SILVA

ESTUDO DE TÉCNICAS DE RECICLAGEM DO POLIESTIRENO EXPANDIDO: UMA
REVISÃO SISTEMÁTICA E UMA PROPOSTA DE REAPROVEITAMENTO

UBERABA

2021

Maria Flávia Borges da Silva

Estudo de técnicas de reciclagem do Poliestireno Expandido: Uma revisão sistemática e uma proposta de reaproveitamento

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Triângulo Mineiro, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, para obtenção do título de mestre.

Orientador: Prof. Dr. Mário Sérgio da Luz

Uberaba

2021

**Catálogo na fonte: Biblioteca da Universidade Federal do
Triângulo Mineiro**

S581e	Silva, Maria Flávia Borges da Silva Estudo de técnicas de reciclagem do poliestireno expandido: uma revisão sistemática e uma proposta de reaproveitamento / Maria Flávia Borges da Silva. -- 2021. 73 p. : il., graf., tab. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) -- Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2021 Orientador: Prof. Dr. Mário Sérgio da Luz 1. Limoneno. 2. Polimerização. 3. Indústria de reciclagem. 4. Óleos e gorduras - Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.). I. Luz, Mário Sérgio da II. Universidade Federal do Triângulo Mineiro. III. Título. CDU 678.7:004.053
-------	---

MARIA FLÁVIA BORGES DA SILVA

ESTUDO DE TÉCNICAS DE RECICLAGEM DO POLIESTIRENO EXPANDIDO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA E UMA PROPOSTA DE REAPROVEITAMENTO

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Triângulo Mineiro, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, para obtenção do título de mestre.

Uberaba, 11 de fevereiro de 2021.

Banca Examinadora:

**Prof. Dr. Mário Sérgio da Luz
Orientador - UFTM**

**Prof^a. Dr^a. Ana Carolina Borella Marfil Anhô
Membro Titular - UFTM**

Prof. Dr. Luís Carlos Scalon Cunha

Membro Titular - IFTM



Documento assinado eletronicamente por MARIO SERGIO DA LUZ, Professor do Magistério Superior, em 11/02/2021, às 12:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#) e no art. 14 da [Resolução nº 34, de 28 de dezembro de 2017](#).



Documento assinado eletronicamente por ANA CAROLINA BORELLA MARFIL ANHE, Professor do Magistério Superior, em 11/02/2021, às 14:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#) e no art. 14 da [Resolução nº 34, de 28 de dezembro de 2017](#).



Documento assinado eletronicamente por Luís Carlos Scalon Cunha, Usuário Externo, em 22/02/2021, às 21:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#) e no art. 14 da [Resolução nº 34, de 28 de dezembro de 2017](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufm.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 0476226 e o código CRC B842155D.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.

Marthin Luther King

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

Primeiramente à Deus, por me proporcionar sabedoria, coragem e persistência para que eu conseguisse concluir mais esta etapa em minha vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Mário Sérgio da Luz pelo apoio, dedicação e paciência na orientação deste trabalho.

À secretária do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Luciana Martins, que sempre me orientou no decorrer desta caminhada.

Ao meu pai, Joaquim, e à minha mãe, Maria Suzana, por investirem na minha educação e por terem feito o melhor que podiam para que eu me tornasse a pessoa que sou hoje.

À minha irmã Cláudia pelo incentivo e companheirismo de sempre.

Aos meus colegas de mestrado, especialmente a Araceli e ao Júlio pelo apoio em todos os momentos em que precisei.

Enfim, agradeço a todos os amigos e familiares que de alguma forma contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional até aqui.

Muito obrigada!

RESUMO

Os resíduos poliméricos são conhecidos pelo seu grande volume e também pelos problemas ambientais que eles causam. O poliestireno expandido (EPS), também conhecido como isopor, faz parte do grupo dos termoplásticos, é um material leve, produz grande volume e é fabricado em grande escala devido sua vasta área de aplicação. O objetivo deste trabalho foi revisar as publicações científicas sobre os métodos de reciclagem de EPS, em especial os processos de dissolução utilizando solventes orgânicos. E diante esta análise prévia também, objetivou-se o estudo preliminar de um processo de reaproveitamento do EPS, utilizando a dissolução do mesmo com d-limoneno e a respectiva recuperação do polímero em meio de óleo de soja residual. A revisão sistemática da literatura foi realizada através de publicações de artigos em revistas internacionais. Foram analisadas publicações relacionadas a reciclagem de EPS e sua posterior aplicação, incluindo 31 artigos. O estudo preliminar de reaproveitamento do EPS foi realizado de acordo com as seguintes etapas: quebra manual em partes menores do EPS; dissolução do EPS com o acréscimo de d-limoneno e agitação manual; separação do solvente do subproduto do poliestireno (PS); caracterização química das amostras por espectrômetro de infravermelho; e a inserção de óleo de fritura residual juntamente com o resíduo obtido através da reciclagem do EPS para recuperação do PS. Os 31 artigos encontrados na revisão estão relacionados a reciclagem de EPS por meio de dissolução, alguns solventes a base de petróleo, são prejudiciais ao meio ambiente, portanto novos estudos estão relacionados a dissolução em solventes naturais, como por exemplo, d-Limoneno e óleos essenciais que são encontrados em frutos cítricos. Resultados da revisão mostraram que mesmo com a dissolução, as características químicas não foram deterioradas como foi demonstrado através de análises de Espectroscopia de Infravermelho (FTIR), Análise termogravimétrica (TGA) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Difração de Raios X (XRD). Uma vez que o material obtido da reciclagem de EPS mantêm suas características iniciais, este pode servir como matéria prima na fabricação de outros produtos. A dissolução de EPS e posterior recuperação com óleo de soja residual apresentaram resultados satisfatórios. Os resultados encontrados mostraram que a reciclagem de polímeros, em estudo o EPS, é uma alternativa eficiente, visto que, a disposição final desses resíduos representa um problema de difícil solução.

Palavras-chave: d-limoneno. Poliestireno expandido. Reciclagem. Óleo residual.

ABSTRACT

Polymeric waste is known for its large volume and for the environmental problems they cause. Expanded polystyrene (EPS), also known as styrofoam, is part of the group of thermoplastics, is a light material, produces large volumes and is manufactured on a large scale due to its wide application area. The aim of this work was to review scientific publications on EPS recycling methods, especially the dissolution processes using organic solvents. And in view of this previous analysis, the objective was the preliminary study of a process for reusing EPS, using its dissolution with d-limonene and the respective recovery of the polymer in residual soy oil. The systematic literature review was carried out in an electronic database. Publications related to EPS recycling and its subsequent application were analyzed, including 31 articles. The preliminary study on the reuse of EPS was carried out according to the following steps: manual breaking into smaller parts of the EPS; dissolution of EPS with the addition of d-limonene and manual agitation; solvent separation from the polystyrene (PS) by-product; chemical characterization of the samples by infrared spectrometer; and the insertion of residual frying oil together with the residue obtained by recycling the EPS to recover the PS. The 31 articles found in the review are related to the recycling of EPS through dissolution, some petroleum-based solvents are harmful to the environment, so new studies are related to dissolution in natural solvents, such as d-Limonene and essential oils that are found in citrus fruits. Even with the dissolution, the studies showed that the chemical characteristics were not deteriorated as demonstrated by the analysis of Infrared Spectroscopy (FTIR), Thermogravimetric Analysis (TGA) and Scanning Electron Microscopy (SEM), X-Ray Diffraction (XRD). Since the material obtained from EPS recycling maintains its initial characteristics, it can serve as a raw material in the manufacture of other products. The dissolution of EPS and subsequent recovery with residual soybean oil showed satisfactory results. The results found showed that the recycling of polymers, in study EPS, is an efficient alternative, since, the disposal end of these residues represents a problem that is difficult to solve.

Keywords: d-limonene. Expandable Polystyrene. Recycling. Residual oil.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Fórmula estrutural do PS (monômeros de estireno em cadeia)	17
Figura 2: Projeto <i>Orange R-Net</i> da multinacional Sony Corporation	23
Figura 3: Fórmula estrutural do d-limoneno	24
Figura 4: Dissolução de EPS com d-limoneno, nos intervalos de 0, 30 e 180 segundos (da esquerda para a direita).....	26
Figura 5: Número de artigos incluídos/Ano na revisão.....	34
Figura 6: % de artigos de acordo com o tipo de reciclagem de EPS.....	34
Figura 7: Fluxograma do processo de seleção dos estudos para a revisão sistemática	35
Figura 8: Exemplificação do EPS que foi utilizado: (A) embalagem de EPS descartada; (B) EPS após ser quebrado manualmente	36
Figura 9: Partículas de EPS reciclado	43
Figura 10: Estrutura dos terpenos usados na dissolução de PS	50
Figura 11: Preparação do Kraft	52
Figura 12: Dissolução do EPS por óleo essencial	52
Figura 13: Processo de dissolução do EPS: (A) início do processo de dissolução; (B) metade do processo de dissolução	58
Figura 14: Processo de separação: (A) Mistura homogênea EPS e d-limoneno; (B) Separação menos denso (subproduto do EPS) e o mais denso (d-limoneno).....	58
Figura 15: Espectro de infravermelho padrão para o poliestireno.....	59
Figura 16: Espectro de infravermelho padrão para o d-limoneno.....	59
Figura 17: Espectro de infravermelho padrão para a fase clara e o poliestireno padrão.....	60
Figura 18: Espectro de infravermelho padrão para a fase escura e o poliestireno padrão	60
Figura 19: Espectro de infravermelho padrão para a fase escura e o d-limoneno padrão.....	61
Figura 20: Reagentes e produtos da reação entre o PS dissolvido e óleo de soja residual.....	61
Figura 21: Análise termogravimétrica do EPS recuperado	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados da literatura sobre as propriedades químicas do poliestireno.....	18
Tabela 2: Comparativo entre diferentes formas de se obter o PS.....	23
Tabela 3: Propriedades químicas do d-limoneno	25

LISTA DE SIGLAS

ABRAPEX - Associação Brasileira de Poliestireno Expandido
ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
AM - Azul de Metileno
ANCAT - Associação Nacional dos Catadores e Catadoras de Materiais Recicláveis
B20/B50 - Biodiesel/diesel
BSEC - Consumo energia de freio
CNS - Nanofolhas de carbono
DCP - Peróxido de Dicumila
DMA - Análise Mecânica Dinâmica
DMF - N-dimetilformamida
DQO - Demanda química de oxigênio
DSC - Calorimetria de Varredura Diferencial
EPS - Poliestireno Expandido
FDA - Dimetil acetal
FTIR - Espectroscopia de Infravermelho
GPS - Grânulos de grafite/poliestireno
HDPE - Polietileno de alta densidade
HWC - Madeira dura com valor agregado
HWCG – Compósito adicional de madeira
LDPE - Polietileno de baixa densidade
MA - Anidrido Maleico
MDF - Placa de fibra média
MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura
MFI - Índice de fluxo de derretimento
MFI - Índice de fluxo de derretimento
NR - Borracha natural reforçada com sílica
PCFs - Flocos de carbono poroso
PDI - Polidispersão
PE - Polietileno
PET - Politereftalato de etileno

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

POPs - Polímeros orgânicos porosos

PVC - Policloreto de vinila

rGEPS - Espuma reciclada de grafite/expandida

RS - Fibras de palha de arroz lignocelulósico

SDS - Dodecil sulfato de sódio

SINDPLAST - Sindicato da Indústria de Material Plástico do Estado de São Paulo

SPS - Poliestireno Estabilizado

TGA - Termogravimetria

wGEPS - Espuma de grafite/EPS

UV/Vis - Espectroscopia no ultravioleta visível

XRD - Difração de raios X

LISTA DE SÍMBOLOS

AlCl₃ - Anidro cloreto de alumínio
AM - Azul de Metileno
C10 - Monoterpeno
C15 – Sesquiterpeno
C20 – Diterpeno
C25 - Sesterpeno
CC - Cloreto cianúrico
CCl₄ - Carbono tetracloreto
CH₃COCl - Acetilcloreto
CO - Monóxido de Carbono
Cu – Cobre
FeO - Óxido de ferro
HCl - Ácido clorídrico
Kg - Quilograma
Kg/m³ - Quilograma por metro cúbico
kGy – Gray
KJ - Joule
KMnO₄ - Permanganato de potássio
mg/l - Miligrama por litro
MgO - Óxido de magnésio
MnO₂ - Dióxido de manganês
NaHCO₃ - Bicarbonato de sódio
NO_x - Óxido de nitrogênio
OD - Oxigênio dissolvido
Zn – Zinco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO DA LITERATURA	16
	2.1 POLIESTIRENO EXPANDIDO - EPS	16
	2.2 RECICLAGEM DO POLIESTIRENO EXPANDIDO	19
	2.3 SOLVENTE ORGÂNICO D-LIMONENO	24
	2.4 ÓLEO RESIDUAL DE FRITURA.....	26
	2.4 POLUIÇÃO AMBIENTAL POR RESIDUOS SÓLIDOS	27
	2.5 REVISÕES DA LITERATURA	30
3	OBJETIVOS	32
	3.1 OBJETIVO GERAL	32
	3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	32
4	METODOLOGIA	32
	4.1 PROTOCOLO DA REVISÃO SISTEMÁTICA	32
	4.2 CONDUÇÃO DA REVISÃO SISTEMÁTICA	33
	4.3 PROCESSOS DE DISSOLUÇÃO DO EPS	35
	4.3.1 Materiais utilizados	36
	4.3.2 Preparação da matéria prima	36
	4.3.3 Processo de dissolução em solvente natural	36
	4.3.4 Recuperação do Poliestireno dissolvido	37
	4.3.5 Caracterização dos produtos	37
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
	5.1 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA.....	37
	5.1.1 Reciclagem de EPS e sua utilização na remoção de Poluentes	37
	5.1.2 Reciclagem de EPS e posterior aplicação na construção Civil	42
	5.1.3 Métodos de reciclagem de EPS por dissolução	46
	5.1.4 Reciclagem de EPS por dissolução em solvente natural	48
	5.1.5 Reciclagem utilizando compósitos naturais e fibras	53
	5.2 PROCESSO DE RECICLAGEM DO EPS	57
6	CONCLUSÃO	63
7	REFERÊNCIAS	64
	APENDICE A – Artigos incluídos na revisão sistemática	71

1 INTRODUÇÃO

Atualmente questões sobre o ciclo de vida de materiais poliméricos vêm se destacando em todo mundo, por se apresentarem como um problema de difícil solução.

A demanda por polímeros plásticos está aumentando, uma vez que esses materiais estão presentes na composição de uma ampla variedade de produtos (TAIATELE JUNIOR, 2020). Seu crescente uso vem se tornando uma complicação em relação ao descarte, a não biodegradabilidade da grande maioria contribui para o acúmulo de resíduos sem destino apropriado, o que levará de dezenas a centenas de anos para ser novamente assimilado pela natureza, causando, grande volume nos aterros sanitários (GIL-JASSO et al., 2019). Materiais biodegradáveis com propriedades semelhantes aos polímeros convencionais estão sendo desenvolvidos na tentativa de substituir parcialmente estes últimos e, assim, minimizar os impactos no meio ambiente. Alguns desses novos polímeros não são apenas biodegradáveis, mas também compostáveis, o que torna possível descartá-los junto com os resíduos orgânicos para serem reciclados por compostagem em vez de serem descartados em aterros (TAIATELE JUNIOR, 2020).

O poliestireno expandido, polímero amplamente conhecido, é o terceiro termoplástico mais utilizado no mundo, após o polietileno (PE) e o polipropileno (PP) (LIU; LIU, 2014). O EPS é formado por 2% de poliestireno e 98% de ar. É um termoplástico de célula fechada inerte, sendo um material leve, possuindo propriedades de rigidez e resistência, baixa condutividade térmica e alta resistência a impactos, e além disso, possui uma ampla gama de compostos químicos em uma faixa de valores de pH (CELLA, 2012; GIL-JASSO et al., 2019). Devido a essas propriedades, o EPS é muito utilizado em diversos setores da indústria, podendo ser encontrado nas embalagens de eletrodomésticos, enchimento de móveis, isolamento acústico, entre outros produtos (HEARON et al., 2013; GUTIÉRREZ-ESTUPIÑÁN et al., 2020).

Por ser um material que está em alta demanda, uma vez usado, é descartado em aterros, permanecendo intacto por várias gerações, causando diversos impactos ao meio ambiente (ZHANG et al., 2018). O gerenciamento desses resíduos envolve alguns obstáculos devido à sua baixa relação massa/volume e elevados custos de transporte, e sua disposição em aterros sanitários é inviável devido a sua baixa degradabilidade (SARMIENTO et al., 2018; ZHANG et al., 2018). Há preocupações científicas referentes a esse resíduo (JANG et al., 2018), pois o mesmo persiste visivelmente no ambiente e por meio de quebra mecânica, ao longo do tempo

eles podem se transformar em partículas menores (microplásticos), inserindo ainda mais no meio ambiente.

No caso dos microplásticos (partículas menores que 4,75 milímetros de diâmetro), a principal preocupação é a ingestão desses materiais. Isso pode ocorrer por meio de vários mecanismos, uma delas é a deglutição da água circundante ou o consumo de organismos que ingeriram microplásticos anteriormente (GALLOWAY; COLE; LEWIS, 2017). Existem vários efeitos potenciais dos microplásticos em diferentes níveis biológicos, que variam de subcelulares a ecossistemas, mas a maioria das pesquisas tem se concentrado em impactos em organismos adultos individuais (RITCHIE E ROSER, 2018). Há evidências crescentes de que a ingestão de microplásticos pode afetar os ecossistemas aquáticos. Quando os organismos ingerem microplásticos, eles podem ocupar espaço no intestino e no sistema digestivo, levando a reduções nos sinais de alimentação. Essa sensação de saciedade pode reduzir a ingestão alimentar (RITCHIE E ROSER, 2018; JIMENEZ-FRANCISCO et al. 2018).

A reciclagem torna-se uma maneira de reduzir os impactos ambientais causados pelo acúmulo desses resíduos gerado a partir das aplicações diárias (BARRERA; OCAMPO; OLAYA, 2017). Em 2010, foi impulsionada no Brasil por meio da aprovação da lei nº 12.305 a Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil, visando a redução, o reuso, a reciclagem e o reaproveitamento dos resíduos sólidos gerados no país (CELLA, 2012). A reciclagem tem maior relevância no mundo moderno, e as estratégias atuais visam melhorar as condições da poluição de materiais poliméricos, reduzindo assim um dos mais significativos poluentes (ZHANG et al., 2018).

Diversos trabalhos na literatura relatam a reciclagem do EPS pós-consumo por mecanismos mecânicos, térmicos, químicos ou termoquímicos (SINGH et al., 2017), que geralmente envolvem compostos tóxicos e processos de alto custo (GIL-JASSO et al., 2019). Outros métodos de gerenciamento desses resíduos são: recuperação energética por incineração e a reciclagem química onde ocorre a decomposição química do resíduo (VILAS BOAS DA SILVA, 2020; AMINUDIM, 2011; HEARON et al., 2014). Estima-se que apenas 1% dos plásticos manufacturados sejam recuperados por reciclagem em todo o mundo, enquanto a maior parte do restante da produção é encaminhada para aterros municipais (SPINACÉ E DE PAOLI, 2004).

Outra técnica de gerenciamento desse resíduo se dá por meio da dissolução, onde, são empregados diferentes solventes na completa dissolução do EPS. Os solventes mais utilizados são: acetona, tolueno, clorofórmio, benzeno, xileno, tetrahidrofurano, pineno, mentol, p-cimeno, d-limoneno, entre outros (GIL-JASSO et al., 2019). Dentre estes, os solventes

orgânicos, os p-cimeno e d-limoneno se destacam por possuírem grande relevância ambiental, pois são alternativas mais sustentáveis ao meio ambiente (ZHAO et al., 2018). O solvente orgânico d-limoneno, pode ser considerado um solvente verde no processo de reciclagem do EPS, visto que o mesmo é proveniente de recursos naturais (subproduto do suco de laranja) (CELLA, 2012). Este tem a capacidade de dissolver o EPS, sem reagir com o mesmo, possibilitando a diminuição de seu volume em um tempo relativamente curto, facilitando o seu transporte e destino final (GIL-JASSO et al., 2019; HEARON et al., 2014).

A dissolução do EPS em solvente orgânico é uma das formas mais eficientes e baratas de se reciclar este tipo de material (GIL-JASSO et al. 2019). As principais vantagens desta técnica são: o volume dos polímeros é reduzido; aditivos e impurezas podem ser removidos; o poliestireno pode ser recuperado e servir para a produção de produtos de qualidade e alto valor agregado (KAMPOURIS et al., 1987). Segundo Noguchi et al. (2011), o poliestireno reciclado por dissolução em d-limoneno mantém suas propriedades mecânicas originais porque há somente 12% de redução da massa molar do PS, enquanto o poliestireno obtido por reciclagem mecânica apresenta 35% de redução devido a degradação física e térmicas das cadeias do polímero.

Com base no exposto acima, este trabalho irá apresentar uma revisão sistemática sobre processos de reciclagem e reaproveitamento do EPS, trazendo uma contextualização acerca deste tópico, permitindo identificar estudos já desenvolvidos e uma visão geral das evidências existentes pertinentes ao estado da arte. Também será apresentado uma nova metodologia para o reaproveitamento do EPS utilizando processos de dissolução deste material, por d-limoneno, e sua subsequente recuperação na presença de óleo de fritura residual.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 POLIESTIRENO EXPANDIDO - EPS

O Poliestireno Expandido, conhecido internacionalmente pela sigla EPS é um dos tipos de Poliestireno (PS) encontrado comercialmente. O PS, por sua vez, é pertencente ao grupo das resinas termoplásticas, sendo um dos mais utilizados no mundo (LIU; LIU, 2014).

Na polimerização da resina PS, é injetado no processo da reação de polimerização um agente químico, que ocasiona a expansão do PS e se obtém uma espuma rígida (o EPS). Em síntese, o EPS é formado de 98% de ar e 2% de poliestireno, obtido através da polimerização do monômero estireno (ABRAPEX, 2017). O EPS é um dos polímeros de maior

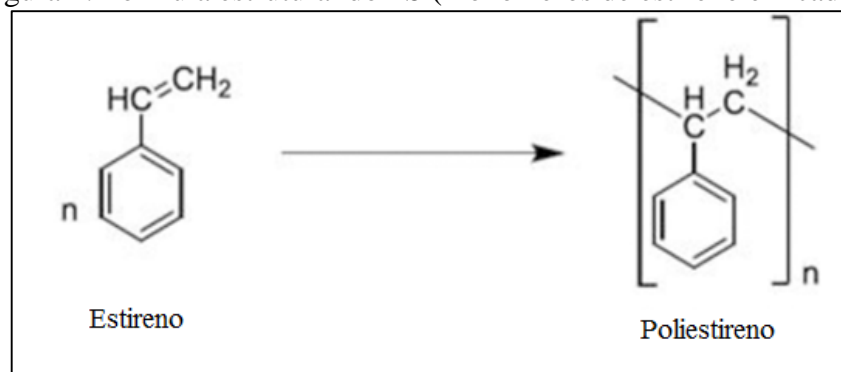
comercialização, visto suas diversificadas aplicações e seu custo baixo (GIL- JASSO et al., 2019, ZANGH et al., 2018).

A nomenclatura isopor é uma marca registrada e a sigla EPS é prevista de acordo com a norma ISO-1043/78. Segundo a Associação Brasileira de Poliestireno Expandido (ABRAPEX, 2017), o isopor, é um material resultante da polimerização do estireno em água, pertencendo ao grupo dos polímeros termoplásticos.

Em detalhes, o processo de transformação física da formação do EPS é realizado em três etapas (AMBIENTE BRASIL, 2020):

- Pré-extensão: em que o aquecimento é feito por contato com vapor de água em um pré-expansor, expandindo o PS para um volume aproximadamente 50 vezes maior que o inicial. Assim, formam-se os grânulos de EPS, compostos de pequenas células fechadas, armazenados para etapa seguinte;
- Armazenamento intermediário: ocorre o resfriamento dos grânulos, que ocasiona depressão no interior das células. Enquanto este processo ocorre, preenche-se de ar o espaço dentro das células;
- Modelagem: o material resultante da etapa anterior é colocado em moldes e exposto ao vapor de água, assim ocorre uma soldagem que permite rigidez ao EPS. Desta maneira, o granulado introduzido insufla e fica modelado conforme pretendido.

Figura 1: Fórmula estrutural do PS (monômeros de estireno em cadeia)



Fonte: Andrade, Bezerra, Calado (2019)

É importante lembrar ainda que, de acordo com a Abrapex (2017), o agente de expansão utilizado no processo supracitado, utiliza-se o pentano, hidrocarboneto este, que é deteriorado, sem prejuízo ao meio ambiente, através reações fotoquímicas originadas dos raios solares.

A Figura 1, apresenta a fórmula estrutural do poliestireno - PS, a qual representa os monômeros de estireno em cadeia. A Tabela 1 apresenta dados da literatura sobre as propriedades químicas do poliestireno.

Tabela 1: Dados da literatura sobre as propriedades químicas do poliestireno

Propriedade	Valor	Unidade	Ref.
Densidade	1,040 - 1,065	kg/m ³	1
Temperatura de transição vítrea	80 – 100	°C	1,2
Temperatura de fusão	240	°C	1
Temperatura de auto-ignição	490	°C	3
Capacidade calorífica (Cp)			
0° C	1,185 – 1,139	kJ/kg.K	1
50 °C	1,256 – 1,394	kJ/kg.K	1
100 °C	1,838 – 1,821	kJ/kg.K	1
dCp /dT (50 °C)	4,04 . 10 ⁻³	kJ/(kg.K ²)	1
Calor de combustão	- 4,33 . 10 ⁻³	kJ/mol	1
Calor de fusão	8,37 ± 0,08	kJ/mol	1
Condutividade térmica			
0° C	0,105	W/m.K	1
50 °C	0,116	W/m.K	1
100 °C	0,128	W/m.K	1

Fonte: CELLA, 2012 apud I BRANDRUP et al.; 1999; 2 FRIED, 1995; e 3 WILKS, 2001.

O interesse comercial nas espumas poliméricas aumentou devido a novas aplicações emergentes e a capacidade de criar uma variedade de materiais poliméricos ou compósitos, a partir desses materiais (ADRIAN et al., 2016). O EPS é matéria prima para diversos produtos como em embalagens de alimentos e eletrônicos, peças de avião e automotivas e equipamentos esportivos, entre outras aplicações. O seu uso aumentou nos últimos anos devido às vantagens de ser leve, fácil de formar, isolante acústico e térmico, de baixo custo de produção, amortecimento, dimensionamento estável e resistente ao calor e à umidade (MAHARANA; NEGI; MOHANTY, 2007). Devido a essas propriedades é um dos polímeros mais difundidos em todo o mundo (LIU; LIU, 2014). Vários produtos criados a partir de EPS são produzidos todos os anos, e em grande escala. No entanto, a sua maioria só pode ser usada uma vez e depois descartado (YANG et al., 2018).

Por ser um produto oriundo do petróleo, o EPS, não possui um caminho claro de reciclagem pós-uso (AMINUDIM et al., 2011). Por isso, é importante avaliar seu ciclo de vida, principalmente para o estudo do impacto ambiental de suas diferentes fases de produção, consumo, descarte e reaproveitamento final de vida (HICKS; MARTEN, 2018).

Segundo Kerber et al. (2020) o EPS é totalmente reciclável e pode ser reciclado muitas vezes devido às suas propriedades mecânicas que são preservadas na fase de matéria-prima. Porém, parte da população está mal informada sobre a reciclabilidade do EPS, o que leva ao seu descarte como resíduo convencional, gerando impactos negativos ao meio ambiente, uma vez que o EPS se transforma em microplásticos quando descartado no meio ambiente, e tem capacidade de absorver compostos tóxicos, como agroquímicos e metais pesados (ANBUMANI E KAKKAR, 2018; DÍAZ-MENDOZA et al., 2020;).

Os métodos de reciclagem, atualmente explorados para esse material, são a geração de energia através da queima, que produz gás carbônico e vapor d'água; e a sua reutilização como matéria-prima para outros produtos de PS (BARCELLOS et al., 2013).

2.2 RECICLAGEM DO POLIESTIRENO EXPANDIDO

A reciclagem é uma das tecnologias mais utilizadas para evitar problemas ambientais desencadeados pelo acúmulo de resíduos poliméricos devido ao uso desses materiais (LIU; LIU, 2014). Uma alternativa promissora ao aterro e incineração para o tratamento de resíduos de EPS. Principalmente, por que esses compósitos poliméricos estão aumentando atualmente, nas indústrias de embalagens e também na construção. Porém, a reciclagem de EPS ainda não é uma prática comum, pois algumas de suas características o tornam de difícil transporte e armazenagem (YANG et al., 2018). Enfim, se o EPS é reciclado, reduz a demanda e os impactos ambientais associados a esse material (ABDULKAREEM; AL-THANI; BHADRA; 2017).

Reciclar o resíduo de EPS pode reduzir o problema da poluição ambiental desse resíduo, mas também tem um significado importante para a sustentabilidade e manejo correto dos recursos naturais (HEARON et al., 2014; JIMENEZ- FRANCISCO et al., 2018).

A indústria de matérias-primas plásticas está em constante movimento devido à grande demanda da população por produtos de baixo custo, ambientalmente corretos, principalmente no que se diz respeito às suas características descartáveis. Da mesma forma, a quantidade de resíduos gerados é alta, considerando que muitos dos produtos, como recipientes ou embalagens de alimentos, são descartados instantaneamente após consumir ou usar seu conteúdo (BETANCOURT; SOLANO, 2016). Aqui, destaca-se o EPS, um dos termoplásticos mais

utilizados mundialmente. Segundo Geyer et al. (2017), esses materiais superaram a maioria dos materiais poliméricos fabricados pelo homem e há muito tempo está sendo estudado a sua relação com o meio ambiente, pois possuem taxa de biodegradação muito lenta (YADAV E SHARMA, 2018). Contudo, faltam informações mais concretas, particularmente sobre o seu destino final.

É importante avaliar as consequências ambientais dos resíduos poliméricos, pois os mesmos são visíveis não somente em nosso país, mas também em níveis globais, podendo contaminar tanto o solo quanto o meio aquático. Embora existam incentivos econômicos e ambientais importantes para a sua reciclagem, as opções de tratamento no final da vida útil desses resíduos são, na prática, bastante limitadas (GARCIA E ROBERTSON, 2017).

Recentemente, surgiram preocupações científicas referentes ao crescimento de resíduos de EPS, uma vez que, este pode persistir no ambiente por centenas de anos. Outra questão está no fato da sua permanência visivelmente no ambiente devido sua fragmentação em partículas menores, a partir da quebra mecânica, ocasionada pela ação das chuvas e ventos, que pode resultar no aumento das concentrações de micropartículas no ambiente aquático (JIMENEZ-FRANCISCO et al., 2018). Nos processos de fragmentação de detritos plásticos, a influência de fatores biológicos permanece amplamente desconhecida (JANG et al., 2018). Uma alternativa para minimizar esses problemas é recuperar os plásticos, para reciclagem ou geração de energia ou desenvolver novos materiais (ANTICO et al., 2020). Diante disso, a reciclagem aparece como uma maneira de reduzir os problemas ambientais causados pelo acúmulo de resíduos poliméricos gerado a partir das aplicações diárias (SARMIENTO et al., 2018).

A reciclagem de materiais à base de polímeros compósitos continua sendo um desafio, apesar dos consideráveis desenvolvimentos que foram feitos nessa área. Muitos pesquisadores tentaram desenvolver processos de reciclagem tecnicamente viáveis, economicamente e ambientalmente aceitáveis para compósitos poliméricos (ANTICO et al., 2017). Suas propriedades como durabilidade, estabilidade química e mecânica dificultam a sua reutilização. Todavia, para evitar o acúmulo indesejado de resíduo plástico, a reciclagem ainda é a melhor opção a ser adotada (HEARON et al., 2018). O gerenciamento desses resíduos continua sendo um importante desafio em muitos países, inclusive no Brasil. No entanto, deixar de gerenciar adequadamente tais resíduos causaria impacto na saúde humana e no meio ambiente (SEOW E ABAS, 2016).

As alternativas mais comuns para lidar com resíduos de polímeros são a reciclagem mecânica e a revalorização energética, onde os resíduos são incinerados e a energia térmica

gera eletricidade. A incineração de polímeros sofre grande oposição devido as metas de redução das emissões de dióxido de carbono (CELLA, 2012). A reciclagem que utiliza métodos mais avançados destaca-se os baseados em degradação térmica, química e os que englobam ambos os processos. A reciclagem de polímeros pode ser classificada em quatro categorias: primária, secundária, terciária e quaternária (SPINACÉ E DE PAOLI, 2004).

- Reciclagem primária: consiste na conversão dos resíduos poliméricos industriais por métodos de processamento padrão em produtos com características equivalentes às das dos produtos originais produzidos com polímeros virgens; por exemplo, aparas que são novamente introduzidas no processamento.
- Reciclagem secundária: conversão dos resíduos poliméricos provenientes dos resíduos sólidos urbanos por um processo ou uma combinação de processos em produtos que tenham menor exigência do que o produto obtido com polímero virgem, por exemplo, reciclagem de embalagens de PP para obtenção de sacos de lixo.
- Reciclagem terciária: processo tecnológico de produção de insumos químicos ou combustíveis a partir de resíduos poliméricos.
- Reciclagem quaternária: processo tecnológico de recuperação de energia de resíduos poliméricos por incineração controlada.

Cabe ressaltar que, a reciclagem primária e a secundária são conhecidas como reciclagem mecânica ou física, o que diferencia uma da outra é que na primária utiliza-se polímero pós-industrial e na secundária, pós consumo. A reciclagem terciária também é chamada de química e a quaternária de energética (SPINACÉ E DE PAOLI, 2004).

A reciclagem mecânica, primária e secundária, são potencialmente atrativas, pois permitem que resíduos poliméricos (pós-industrial ou pós-consumo) sejam reaproveitados como fonte de matéria-prima na cadeia produtiva através de métodos tradicionais de processamento, de forma que os materiais finais apresentem características similares ou superiores às observadas nos materiais poliméricos virgens, tidos como produtos de partida no processo de reuso dos plásticos (SPINACÉ E DE PAOLI, 2004).

Uma das desvantagens da reciclagem mecânica, é que, as peças devem estar livres de contaminantes, portanto, é pouco útil na reciclagem de recipientes que estiveram em contato com bebidas ou produtos alimentícios (JIMENEZ-FRANCISCO et al., 2018). Neste método o material passa por diversas etapas sendo: um moedor, onde é reduzido em partes menores, para que possa ser passado na extrusora. Na extrusora o material é fundido e homogeneizado, saindo na forma de cordões que são resfriados em um banho de água, para então serem granulados e

ensacados. O material reciclado pode ser reprocessado, por meio de injeção, extrusão, sopro, calandragem e termoformagem, por exemplo. Durante a reciclagem mecânica há a degradação das cadeias poliméricas e a consequente perda de qualidade do poliestireno reciclado (HATTORI et al., 2008).

Uma maneira de utilização do EPS em rotas de reciclagem, foi apresentado pela Ambiente Brasil, que se trata de um projeto realizado em Curitiba, visa à substituição da brita na fabricação do concreto pelo EPS. Assim é obtido um concreto leve, constituído por cimento, areia, cola e EPS. É importante mencionar que, os estudos visavam realizar ensaios técnicos, os quais são de resistência ao fogo, à compressão e à dilatação. Tal concreto possui grande vantagem para a construção, visto seu custo relativamente baixo e funcionamento como isolante térmico e acústico (AMBIENTE BRASIL, 2020).

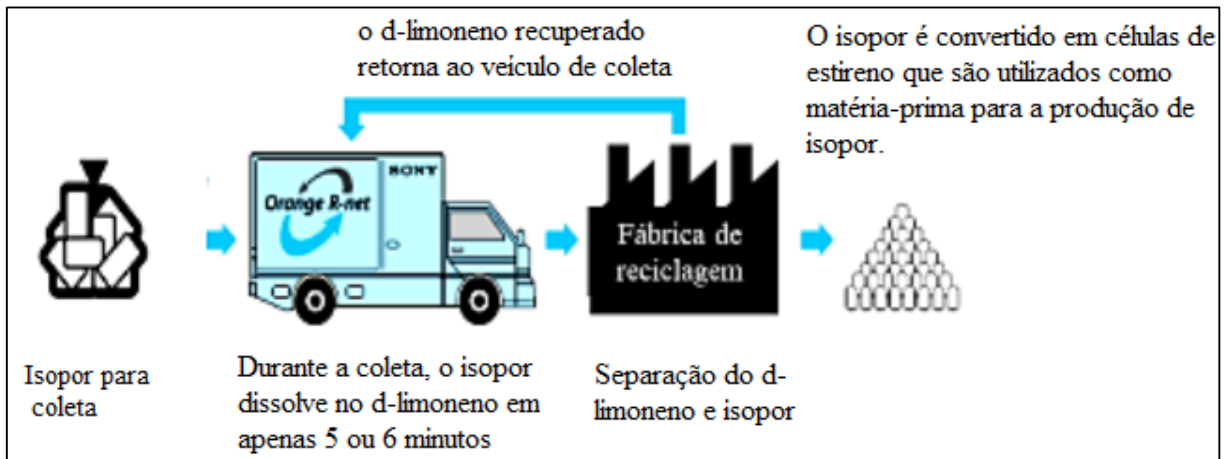
Os métodos de processamento para a reciclagem de polímeros podem ser divididos basicamente em reciclagem mecânica e em métodos mais avançados (KAMPOURIS et al. 1987). Entre os chamados métodos avançados destacam-se os baseados em degradação térmica, degradação termo-oxidativa, hidrogenação, solvólise e dissolução em solventes. O tratamento dado a esse resíduo depende sobretudo de sua natureza, como por exemplo, os materiais termoplásticos, por meio da solubilidade em solventes orgânicos, ou por meio da degradação térmica e/ou química (CAMPELO E MACHADO, 2020). Como exemplo de métodos mais avançados de reciclagem do EPS temos o método por dissolução em solventes, porém alguns destes apresentam toxicidade (GIL-JASSO et al., 2019). Esta toxicidade dos solventes convencionais, e os danos ambientais dos mesmos limitam sua aplicabilidade (HEARON et al., 2014).

A reciclagem por dissolução é um dos métodos mais eficientes e baratos de se reciclar o poliestireno expandido (HEARON et al., 2014). As principais vantagens desta técnica são: redução do volume do material, separação de diferentes plásticos, remoção de aditivos e impurezas, obtenção de produtos de maior qualidade. A reciclagem de espumas de poliestireno por dissolução em solventes pode ter um importante papel na reciclagem, sendo uma alternativa a incineração e a reciclagem mecânica (CELLA, 2012). Como exemplo da utilização dessa técnica de reciclagem do EPS, existe o projeto denominado *Orange R-Net*, implementado pela multinacional japonesa, Sony Corporation, em Tokyo no Japão, atuante desde 1996, no qual o projeto promove a reciclagem do isopor pela dissolução em d-limoneno.

A Figura 2 mostra como o projeto (*Orange R-Net* da multinacional Sony Corporation) é realizado. Em síntese, um caminhão com solvente orgânico d-limoneno em seu interior passa recolhendo o isopor pela cidade, o qual é direcionado para a reciclagem, após esta etapa o

resíduo é novamente transformado em isopor e moldado para a utilização da empresa. O caminhão possui dois tanques de 270 litros de d-limoneno, que pode transportar cerca de 300 quilogramas de poliestireno dissolvido, o que equivale a um volume de cerca de 25 m³ de isopor (SONY, 2003).

Figura 2: Projeto *Orange R-Net* da multinacional Sony Corporation



Fonte: Neves, 2017

Na Tabela 2 são apresentados dados publicados pela empresa em que há a comparação entre a reciclagem por dissolução, a reciclagem mecânica utilizando compressão por aquecimento e a produção de poliestireno natural. Podemos observar que a reciclagem por dissolução, utilizando o d-limoneno é extremamente vantajoso frente aos outros métodos apresentados.

A Sony (2003) elaborou também um estudo sobre a avaliação do ciclo de vida do resíduo de poliestireno expandido, que consiste em uma técnica de avaliação em que há a somatória do impacto ambiental de um produto em todas as etapas de sua existência, desde que é inserido no mercado até o seu descarte final.

Tabela 2: Comparativo entre diferentes formas de se obter o PS

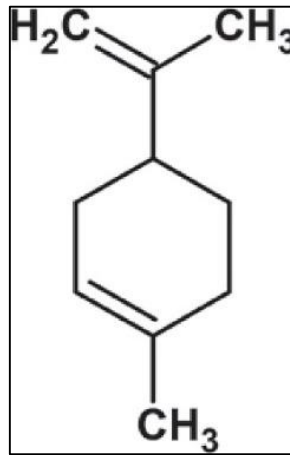
	Emissão de CO ² (kg/kg _{PS})	Consumo de energia (MJ/kg _{PS})
Reciclagem por dissolução	0,79	12,8
Reciclagem mecânica tradicional	1,12	16,1
Produção de PS virgem	2,23	76,5

Fonte: SONY, 2003

2.3 SOLVENTE ORGÂNICO D-LIMONENO

O d-limoneno trata-se de um hidrocarboneto cíclico insaturado e volátil, formado por duas unidades de isopreno (HEARON et al., 2014). É o principal componente de óleos naturais encontrados em frutos cítricos e é largamente o solvente mais investigado e utilizado (GIL-JASSO et al., 2019). É um subproduto industrial da fabricação do suco de laranja, principalmente devido a que tal óleo essencial, do qual é extraído, ser pouco solúvel em água, e ter alta tendência à oxidação e polimerização (GIL-JASSO et al., 2019, HEARON et al., 2014).

Figura 3: Fórmula estrutural do d-limoneno



Fonte: Camargo et al, 2020

A molécula do limoneno é opticamente ativa, cujos enantiômeros são distinguidos da seguinte maneira: o d-limoneno e o l-limoneno, com odor de laranja e limão, respectivamente (NOGUCHI; MIYASHITA; WATANABE, 2011). A fórmula estrutural do d-limoneno está apresentada na Figura 4. A Tabela 3 apresenta as propriedades químicas do d-limoneno.

O Brasil é o maior exportador de suco de laranja, sendo responsável por 85% da exportação mundial em 2010. Neste mesmo ano 86% de toda a laranja colhida no Brasil foi direcionada para a indústria de suco, que produziu em torno de dois milhões de toneladas de suco de laranja (CITRUSB, 2012).

O d-limoneno é utilizado em grande escala como solvente orgânico e, no que se diz respeito a dissolução do poliestireno expandido, assume papel de destaque pois dissolve a mesma quantidade de resíduos de EPS que outros solventes orgânicos, com um custo menor (HEARON et al., 2014, MUMBACH et al., 2019). Além disso, o solvente orgânico d-limoneno pode ser considerado uma solução verde se comparado a outros métodos de reciclagem de poliestireno, pois as emissões de gás carbônico são reduzidas em comparação com outros

métodos e oferece a oportunidade da reutilização do material, embora essa ainda seja uma área em desenvolvimento (HEARON et al., 2014, JIMENEZ-FRANCISCO et al., 2017).

Tabela 3: Propriedades químicas do d-limoneno

Propriedade	Valor	Unidade	Ref.
Massa molar	136,24	g/mol	1
Densidade	0,845	g/cm	2
Temperatura de fusão	-74	°C	3
Temperatura de ebulição	176	°C	2
Temperatura de auto-ignição	237	°C	2
Temperatura de fulgor (flash point)	50	°C	2
Viscosidade (25 °C)	0,9	cP	2
Calor de fusão	84	kJ/kg	3
Calor latente de vaporização	290	kJ/kg	3
Capacidade calorífica (Cp) (50°C)	250	J/(mol.°C)	1
Capacidade calorífica (Cp) (50°C)	0,44	cal/(g.°C)	1

Fonte: CELLA, 2012 apud 1 NIST, 2012; 2 FLORIDACHEMICAL, 2012; 3CHEMICALDICTIONARY, 2012

Nos últimos anos, a aplicação do d-limoneno aumentou devido ao fato de ser uma substância originária de fontes renováveis; é também biodegradável, não corrosivo e não tóxico, representando assim um biosolvente alternativo na substituição à solventes tóxicos (HATTORI, 2008). Podemos aqui destacar a dissolução do EPS, que se manifesta como alternativa ecológica na reciclagem desse material polimérico (HEARON et al., 2014, JIMENEZ-FRANCISCO et al., 2018). Este processo pode ser observado na Figura 4, na qual apresenta a dissolução de um bloco de EPS, utilizando d-limoneno, nos intervalos de 0, 30 e 180 segundos (da esquerda para a direita) após o contato do d-limoneno com o poliestireno expandido (SONY, 2003). Pode-se observar a dissolução completa do EPS depois do curto intervalo de tempo de 180 segundos.

Figura 4: Dissolução de EPS com d-limoneno, nos intervalos de 0, 30 e 180 segundos (da esquerda para a direita)



Fonte: SONY, 2003

2.4 ÓLEO RESIDUAL DE FRITURA

A produção de óleos e gorduras residuais vem crescendo em todas as áreas metropolitanas do país e frequentemente representa problemas técnicos, econômicos e ambiente. Eles também podem conter uma alta porcentagem de ácidos graxos livres, o que leva a uma maior exigência de metanol para evitar a formação de sabões (HERNANDEZ E DIAZ JIMENEZ, 2018).

Seu descarte quando não tratado lançado em redes de esgoto pode causar bloqueios nas linhas de condução, corrosão de tubulações e maus odores, entre outros. Eles também afetam a eficiência das estações de tratamento de águas residuais, uma vez que requerem processos específicos para sua eliminação (HERNANDEZ E DIAZ JIMENEZ, 2018). Em corpos d'água quando descartados incorretamente pode ocasionar danos, pois o óleo forma uma camada na superfície que impede a entrada da luz solar nesse ecossistema, diminuindo a fotossíntese e consequentemente o oxigênio dissolvido (OD), provocando a morte de organismos aquáticos (VELOSO et al., 2011). Os solos também são impactados quando recebe óleo vegetal virgem ou residual, pois este o impermeabiliza, desestruturando-o e causando diversos problemas, assim como a infiltração e consequentemente a contaminação do lençol freático (FILHO et al., 2015).

Outra forma de descarte é aquela feita em aterros ou terrenos baldios, ambas uma forma errônea de descarte, pois esses resíduos são de difícil decomposição. Quando descartados desta forma podem impermeabilizar o solo, dificultando a penetração de água, gerando enchentes e afetando a renovação dos lençóis freáticos e mananciais (VELOSO et al., 2011). Estudos realizados por Costa Neto et al. (2000) mostram que, de um modo geral, o aproveitamento integrado de resíduos gerados na indústria alimentícia pode evitar o encaminhamento a aterros sanitários, permitindo o estabelecimento de novas alternativas empresariais, minimizando o impacto ambiental e acúmulo desses resíduos. Esse problema ambiental pode ser minimizado

ou até mesmo evitado por meio da coleta adequada desse resíduo. Diante disso, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) tem como um dos seus princípios a coleta seletiva, os sistemas de logística reversa e outras ferramentas relacionadas à implementação da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos (BRASIL, 2010).

2.4 POLUIÇÃO AMBIENTAL POR RESÍDUOS SÓLIDOS

A lei nº 12.305, aprovada em agosto de 2010, institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), dispondo sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis (BRASIL, 2010). A gestão integrada de resíduos sólidos de acordo com PNRS, entende-se como:

Um conjunto de ações voltadas para a busca de soluções para os resíduos sólidos, de forma a considerar as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, com controle social e sob a premissa do desenvolvimento sustentável (BRASIL. LEI 12.305/2010).

A partir do marco legal instituído pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12305/2010) os municípios brasileiros tornam-se responsáveis em gerenciar os resíduos sólidos urbanos (RSU), desde a sua coleta até a sua disposição final (CARBONAI; BAUM; CAMIZ, 2020). Entende-se como RSU na PNRS:

Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humana em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe a proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d' água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (Lei 12.305 / 2010. Art. 3º. Parágrafo XVI).

Os RSU vêm aumentando em volume em todo o mundo, principalmente nos países em desenvolvimento, podendo causar graves impactos ao meio ambiente e à saúde pública (PEREIRA E FERNANDINO, 2019). No Brasil, a maioria dos RSU é descartada em lixões e aterros sanitários pouco controlados e de baixa qualidade (VILAS BOAS DA SILVA, 2020).

Nos países em desenvolvimento, o gerenciamento de resíduos sólidos urbanos é uma tarefa bastante difícil pois, além dos aspectos econômicos e ambientais, há também o aspecto social representado pelo catador, trabalhador informal da cadeia de reciclagem que participa ativamente da coleta, classificação e comercialização de resíduos sólidos urbanos que são potencialmente recicláveis (FIDELIS et al. 2020).

A PNRS estabelece a diferença entre resíduo sólido e rejeito no que se refere ao reaproveitamento e reciclagem dos materiais, admitindo a disposição final apenas dos rejeitos. Sendo que, rejeitos são resíduos sólidos que, depois de não existirem possibilidades de tratamento e recuperação processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não ser a disposição final ambientalmente adequada. O Resíduo sólido é aquele material descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010). Alguns conceitos de sustentabilidade também são citados, como as relações entre consumo e produção e a responsabilidade compartilhada no ciclo de vida dos produtos: série de etapas que envolvem o desenvolvimento do produto, a obtenção de matérias-primas e insumos, o processo produtivo, o consumo e a disposição final (NASCIMENTO, 2017).

O ciclo de vida de um produto é uma série de etapas que envolve desde o desenvolvimento do produto, obtenção de matérias primas e insumos, o processo produtivo, consumo e sua disposição final (BRASIL, 2010). Uma abordagem do ciclo de vida para avaliar os impactos ambientais ajuda os fabricantes a entender como suas escolhas influenciam o que acontece em cada estágio da vida de um produto, para que possam tomar decisões informadas que podem ajudar a reduzir os encargos gerais para o meio ambiente. A responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos é o conjunto de atribuições individualizadas e encadeadas dos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, dos consumidores e dos titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo e também para reduzir os impactos causados à saúde humana e à qualidade ambiental decorrentes do ciclo de vida dos produtos, nos termos da Lei 12.305/2010 (art. 3º, XVII) (MACHADO, 2012).

A Lei estabelece uma cadeia de responsabilidade, envolvendo todos os que entram no ciclo de vida do produto, isto é, na série de etapas que envolvem o desenvolvimento do produto, a obtenção de matérias-primas e insumos, o processo produtivo, o consumo e a disposição final (art. 3º, IV) (BRASIL, 2010). Mas esse encadeamento não retira a individualização de cada ação ou omissão da pessoa física ou jurídica, de direito público ou de direito privado. A lei também orienta a hierarquia de ações a serem seguidas na gestão e no gerenciamento dos resíduos sólidos. Uma das prioridades, nesse sentido, é a reciclagem – entendida como o processo de transformação de resíduos que envolve a alteração de propriedades físicas, físico-

químicas ou biológicas e que dá origem a novos insumos ou novos produtos (ABRELPE, 2019). A reciclagem é um processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes (BRASIL, 2010).

A Agência de Proteção Ambiental dos Estado Unidos (EPA), estimou a geração de 14,5 milhões de toneladas de recipientes e embalagens de plástico em 2018, aproximadamente 5,0 por cento da geração de RSU. Alguns deles incluem refrigerante de polietileno tereftalato (PET) e garrafas de água, jarros de leite e água de polietileno de alta densidade (HDPE), produtos de filme (incluindo bolsas e sacos) feitos de polietileno de baixa densidade (LDPE) e outros recipientes e embalagens feitos de cloreto de polivinila (PVC), poliestireno (PS), polipropileno (PP) e outras resinas. A quantidade de recipientes e embalagens de plástico reciclado em 2018 foi de 1,9 milhão de toneladas ou 13,1 por cento dos recipientes e embalagens de plástico gerados. Além disso, cerca de 17 por cento dos recipientes de plástico e resíduos de embalagens gerados foram queimados com recuperação de energia, enquanto o restante (69,9 por cento) foi aterrado (EPA, 2020). Na Europa, em 2018, a produção de plásticos alcançou quase 62 milhões de toneladas, incluindo termoplásticos, poliuretanos, termofixos, elastômeros, adesivos, revestimentos e selantes e PP-Fibras. Desde 2006 a quantidade de lixo plástico enviado para a reciclagem dobrou. Porém, 25% dos resíduos plásticos ainda foram enviados para aterro em 2018. As taxas de reciclagem de embalagens de resíduos plásticos na Europa ficam entre 26% e 52%. Estes valores podem ser explicados pelas diferenças na infraestrutura e comportamento do consumidor de cada região (PLASTICS EUROPE, 2019). Já a geração doméstica de resíduos plásticos gerados na China foi de cerca de 61 milhões de toneladas em 2016, dados obtidos por Ritchie e Roser (2018).

No Brasil, em 2018, foram gerados 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, um aumento de pouco menos de 1% em relação ao ano anterior. Desse montante, 92% (72,7 milhões) foram coletados uma alta de 1,66% em comparação a 2017, o que mostra que a coleta aumentou num ritmo um pouco maior que a geração. Porém, 6,3% milhões de toneladas ficaram de serem recolhidos nas cidades, dados obtidos pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - 2019 (ABRELPE).

Desses 72,7 milhões de toneladas coletadas no Brasil em 2018, 59,5% tiveram disposição final adequada e foram encaminhadas para aterros sanitários – uma expansão de 2,4% em relação ao valor total do ano anterior. Porém, unidades inadequadas como lixões e aterros controlados ainda têm participação significativa (23% e 17,5%, respectivamente). Estes

estão presentes em todas as regiões e recebem mais de 80 mil toneladas de resíduos por dia, com elevado potencial de poluição ambiental e impactos negativos à saúde (ABRELPE, 2019). Embora os aterros sanitários sejam considerados destinos adequados aos RSU, os processos de reciclagem evitam a disposição em aterros sanitários, minimizando o problema da falta de espaço, e propicia o retorno do material para o ciclo produtivo, gerando economia de recursos naturais, de energia elétrica e de água consumidos na produção de matérias-primas virgens (SINDIPLAST, 2011).

Cada região apresenta uma geração de RSU diferente, o Sudeste em comparação das demais regiões, produz resíduos em uma quantidade maior que sua participação na população brasileira: concentra 42% dos habitantes, mas gera 50% dos RSU, com um índice per capita de 1,23 kg por dia. A região mais populosa do Brasil, o sudeste, é também a que mais produz resíduos e a que mais coleta ainda de acordo com a Associação. Os 1.668 municípios do Sudeste geraram 108.063 toneladas de RSU por dia em 2018, das quais 98,1% foram coletadas. Dados obtidos pelas cooperativas e associações de catadores acompanhadas pela Associação Nacional dos Catadores e Catadoras de Materiais Recicláveis (ANCAT), estão divididos nas seguintes categorias: papéis, plásticos (incluindo isopor, PS, PET, PP, PVC e outros), alumínio, outros metais (sucata e cobre, por exemplo), vidros e outros materiais (eletroeletrônicos, óleos e gorduras residuais e outros materiais não especificados).

Dos resíduos coletados na região, 27% tiveram como destinação os aterros controlados e lixões. De acordo com a Abrelpe (2019), enquanto o mundo avança em direção a um modelo mais moderno e sustentável de gestão de resíduos, o Brasil ainda continua apresentando as deficiências verificadas há diversos anos, ficando infelizmente abaixo dos indicadores médios de nações da mesma faixa de renda e desenvolvimento. Ao avaliar dados de mais uma década, percebe-se que pouco foi feito com o objetivo de realmente reverter o quadro deficitário e que o tema ainda não constitui uma prioridade na agenda política e social do país (ABRELPE, 2019).

2.5 REVISÕES DA LITERATURA

Uma revisão da literatura é uma análise crítica aprofundada da pesquisa acadêmica, publicada, relacionada a um tópico específico. Esse tipo de pesquisa pode incluir artigos de periódicos, livros, capítulos de livros, dissertações e teses ou anais de conferências (UNIVERSITY OF NORTH CAROLINA, 2020). A revisão de literatura discute informações publicadas sobre determinada questão específica sendo, às vezes, consideradas apenas as

publicações realizadas em determinado período de tempo (GRIFFITH UNIVERSITY, 2020; UNIVERSITY OF SOUTH CAROLINA, 2020).

Esse tipo de revisão pode ser apenas um simples resumo das fontes, mas geralmente tem um padrão de organização e relaciona resumo e síntese. O resumo trata-se de uma recapitulação das informações importantes da fonte do estudo em questão, já a síntese é uma reorganização dessas informações. Pode dar uma nova interpretação de material antigo ou combinar novas com velhas interpretações (GRIFFITH UNIVERSITY, 2020). Ou pode rastrear a progressão intelectual do campo, incluindo debates importantes. E dependendo da situação, a revisão da literatura pode avaliar as fontes e aconselhar o leitor sobre as mais relevantes (UNIVERSITY OF SOUTH CAROLINA, 2020). Todo o processo consiste em analisar, avaliar e, finalmente, pesquisar um tópico, com ou sem pensar sobre ele (GRIFFITH UNIVERSITY, 2020; PRO THESIS WRITER, 2020).

De acordo com a Business Research Methodology (2020) existem muitos tipos de revisão de literatura e dentre elas temos a revisão narrativa da literatura e a revisão sistemática. A revisão narrativa extrai conclusões sobre o tópico e identifica lacunas ou inconsistências em um corpo de conhecimento. (GRIFFITH UNIVERSITY, 2020). De outro lado, a revisão sistemática da literatura requer uma abordagem mais rigorosa e bem definida em comparação com a maioria dos outros tipos de revisão da literatura. A revisão sistemática da literatura é abrangente e detalha o período de tempo em que a literatura foi selecionada (UNIVERSITY OF NORTH CAROLINA, 2020).

A literatura narrativa ou tradicional analisa as críticas e resume um corpo da literatura sobre o tópico da tese. A literatura é pesquisada nas bases de dados relevantes e geralmente é muito seletiva no material usado. Os critérios de seleção da literatura para uma revisão narrativa nem sempre estão abertos ao leitor. Essas revisões são muito úteis para reunir e sintetizar a literatura localizada (GRIFFITH UNIVERSITY, 2020; GRANT E BOOTH, 2009). O objetivo principal de uma revisão narrativa é fornecer ao autor e ao leitor uma visão geral abrangente do tópico e destacar áreas significativas de pesquisa. As revisões narrativas podem ajudar a identificar lacunas na pesquisa e ajudar a refinar e definir questões de pesquisa. Onde uma abordagem narrativa difere de uma abordagem sistemática é na notação dos critérios de métodos de pesquisa para seleção (GRIFFITH UNIVERSITY, 2020; GRANT E BOOTH, 2009).

Dependendo do propósito do autor e do contexto no qual a revisão da literatura será apresentada, uma abordagem seletiva ou abrangente pode ser adotada. Na abordagem seletiva, um único ou um número limitado de fontes é revisado (por exemplo, como em um trabalho

bibliográfico anotado ou na introdução de um artigo de jornal). Uma abordagem abrangente requer a revisão de vários livros e artigos (por exemplo, como em um artigo de revisão), que podem ser apresentados como um capítulo substancial em uma tese de pesquisa ou publicados por conta própria como um artigo de revisão acadêmica (MONASH UNIVERSITY, 2020; GRIFFITH UNIVERSITY, 2020). No entanto, o foco de uma revisão da literatura em uma tese de pesquisa de pós-graduação é identificar lacunas e argumentar sobre a necessidade de novas pesquisas (MONASH UNIVERSITY, 2020).

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão sistemática da literatura e uma análise crítica aprofundada sobre os processos de reciclagem do poliestireno expandido, em especial os processos de dissolução utilizando solventes orgânicos. Com base nesta análise prévia da literatura, também, objetivou-se o estudo preliminar de um processo de reaproveitamento do EPS, utilizando a dissolução do mesmo com d-limoneno e a respectiva recuperação do polímero em meio de óleo de soja residual.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar uma revisão sistemática da literatura e uma análise crítica aprofundada sobre os processos de reciclagem do poliestireno expandido;
- Propor uma metodologia para a reciclagem do EPS utilizando o método da dissolução com d-limoneno;
- Recuperar o material polimérico dissolvido;
- Propor uma finalidade para o material recuperado.

4 METODOLOGIA

4.1 PROTOCOLO DA REVISÃO SISTEMÁTICA

Para obtenção das fontes bibliográficas utilizadas nesta revisão sistemática foram selecionados artigos científicos publicados em revistas indexadas em bases de dados científicas,

(Periódicos CAPES, Web of Science, Science Direct, Scientific Electronic Library Online), estas foram selecionadas devido à confiabilidade e qualidade dos artigos publicados, que passam por revisão criteriosa e que estão disponíveis para o acesso pela comunidade acadêmica. E as palavras chave que foram empregadas nesta pesquisa foram: d-limonene, Expanded polystyrene, Recycling, residual oil. Outros quesitos levados em consideração foram: a área de concentração, número de periódicos indexados, atualização e facilidades de refino das pesquisas. Todos os artigos inseridos nesta revisão sistemática são de revistas internacionais.

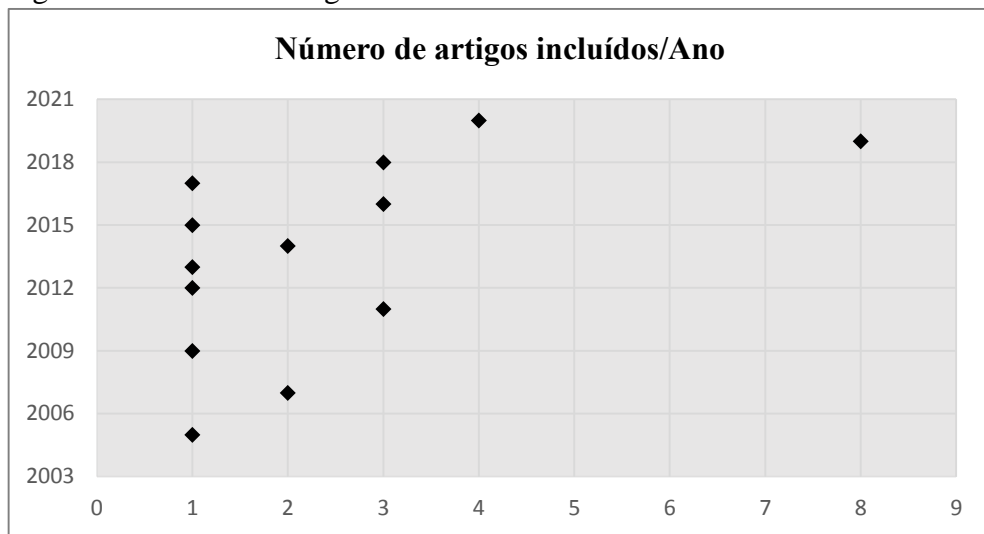
Em seguida, foram definidos os critérios de elegibilidade para a seleção dos estudos primários. O primeiro deles foi que os estudos deveriam abordar a questão de pesquisa selecionada, ou seja, deveriam abordar os métodos avançados de reciclagem do poliestireno expandido. Além disso, foram adotados outros critérios como: publicação em revista científica em formato de artigo; publicação em inglês, português ou espanhol; quanto ao ano de publicação a maioria dos artigos predomina entre 2016 a 2020.

A busca bibliográfica foi realizada de forma independente pelos pesquisadores, verificando-se as informações contidas tanto nos resumos, assim como em todo o texto dos artigos, sempre obedecendo aos critérios de inclusão e exclusão definidos previamente.

4.2 CONDUÇÃO DA REVISÃO SISTEMÁTICA

Após a pesquisa a base de dados, foram utilizados os filtros de busca para selecionar o período de abrangência e os idiomas desejados. Primeiramente os títulos dos documentos encontrados em cada uma das bases, seus respectivos anos de publicação e o nome da base foram dispostos em uma planilha eletrônica do Excel®. Após a classificação dos artigos em ordem alfabética, foram excluídos aqueles detectados em mais de uma base, sendo mantido apenas um registro. O processo de avaliação da elegibilidade consistiu s seguintes etapas: uma triagem dos documentos, com leitura do título e resumo, e uma etapa de confirmação, na qual foi realizada a leitura completa do artigo. A triagem pela leitura do título e do resumo foi realizada pelos autores deste trabalho entre o período 03/2019 a 08/2020 e serviu para desclassificar os aqueles que claramente não atendiam aos critérios de elegibilidade e manter apenas os possivelmente elegíveis. Uma planilha eletrônica do Excel® foi elaborada com as informações dos registros possivelmente elegíveis (título e ano de publicação). Por fim, foi realizada a leitura completa dos artigos para confirmar a sua elegibilidade. Ao todo foram escolhidos 31 artigos (Apêndice A). A Figura 5 apresenta o ano de publicação e o número de artigos utilizados, publicados naquele ano.

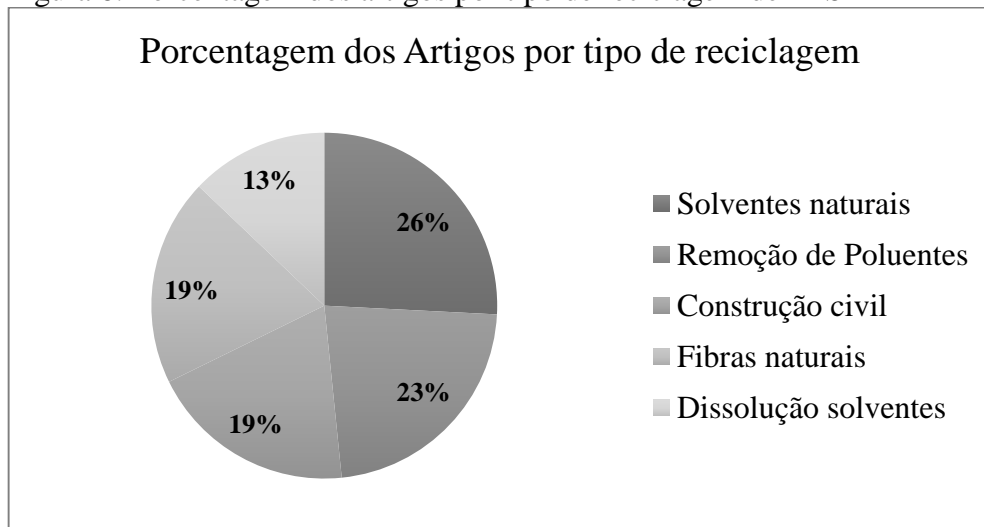
Figura 5: Número de artigos incluídos/Ano na revisão



Fonte: Elaborado pela autora, 2021

Dos 31 artigos 19,35% tratavam sobre a reciclagem de EPS e sua utilização na remoção de poluentes, 22,58% de reciclagem de EPS e posterior aplicação na construção civil, 12,90% de métodos de reciclagem de EPS por dissolução, 25,8% de reciclagem de EPS por dissolução em solvente natural e 19,35% de reciclagem de EPS utilizando compósitos naturais e fibras. Dentre os artigos selecionados a reciclagem de EPS por meio de dissolução em solvente natural, incluindo o solvente orgânico d-limoneno foi o mais encontrado, seguido pela reciclagem de EPS (Figura 6).

Figura 6: Porcentagem dos artigos por tipo de reciclagem de EPS



Fonte: Elaborado pela autora, 2021

A Figura 7 apresenta um fluxograma do processo de seleção dos artigos para a confecção da revisão.

Figura 7: Fluxograma do processo de seleção dos estudos para a revisão sistemática



Fonte: Elaborado pela autora, 2021

4.3 PROCESSOS DE DISSOLUÇÃO DO EPS

Nesta seção serão apresentados os materiais métodos utilizados no processo de dissolução do EPS e a posterior e recuperação da massa polimérica.

4.3.1 Materiais utilizados

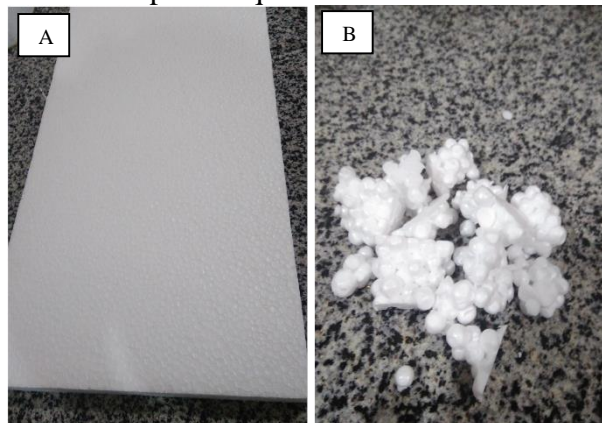
A seguir são listados os materiais utilizados neste trabalho:

- Poliestireno Expandido (EPS);
- d-limoneno;
- Óleo de fritura.
- Funil de separação

4.3.2 Preparação da matéria prima

O poliestireno expandido utilizado nesta proposta foi recolhido de embalagens descartadas de uma loja de móveis na cidade de Araxá – MG. O EPS foi triturado manualmente em partes menores (veja a Figura 8) para facilitar o contato com o solvente.

Figura 8: Exemplificação do EPS que foi utilizado: (A) embalagem de EPS descartada; (B) EPS após ser quebrado manualmente



Fonte: Do Autor, 2021

4.3.3 Processo de dissolução em solvente natural

Para a dissolução do EPS foi utilizado o solvente natural d-limoneno. Este foi adquirido com uma pureza de aproximadamente 99%, fornecido pela empresa “Óleos Essenciais”. Inicialmente foram realizados testes para a determinação do volume ideal de solvente a ser adicionado a uma determinada massa de EPS, para melhor efeito do processo de dissolução.

A relação obtida foi de 60 ml de solvente para cada 15 g de EPS fragmentado. Esta proporção foi determinada em ensaios preliminares. A mistura foi agitada com bastão de vidro até a completa dissolução do EPS.

4.3.4 Recuperação do Poliestireno dissolvido

Após a separação, a fase clara, contendo o poliestireno dissolvido, foi adicionada a uma determinada quantidade de óleo de soja residual (utilizado em processos de fritura). Notou-se que ocorria a formação de um agregado polimérico sólido. Este processo ainda está em fase de otimização, no entanto, neste trabalho serão reportados resultados da mistura de 50% em volume de PS dissolvido com 50% de óleo de soja residual. Algumas informações a respeito do processo de mistura não serão informadas aqui pois poderão resultar em um processo de proteção intelectual.

4.3.5 Caracterização dos produtos

Os produtos resultantes do processo de dissolução, e também do processo de recuperação polimérica, foram analisados por espectroscopia de absorção no infravermelho. Esta técnica é utilizada para identificar a natureza química dos constituintes da mistura após o processo de dissolução e também do polímero recuperado. As análises foram realizadas no laboratório de química geral do Instituto de Ciências Tecnológicas e Exatas da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, em Uberaba- MG. Também foram realizadas análises de análise térmica gravimétrica (TGA) do material polimérico recuperado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Atualmente, a reciclagem de EPS não é uma prática comum, pois algumas de suas características como baixa densidade a torna volumosa e não representa uma oportunidade de negócio rentável (BETANCOURT E SOLANO, 2016). Em contrapartida, quando o EPS é reciclado, reduz a demanda e os impactos ambientais associados ao consumo e descarte inadequado (HICKS, MARTEN, 2018; KERBER et al., 2020).

Os estudos sobre a reciclagem de EPS ainda são restritos. A seguir, serão apresentados métodos de reciclagem para esse resíduo e sua posterior utilização após reciclado.

5.1.1 Reciclagem de EPS e sua utilização na remoção de Poluentes

No trabalho de Hu et al. (2019) foi realizado uma abordagem sobre os problemas relacionados a poluição da água por corantes, antibióticos e clorofenóis, que está cada vez mais em crescimento, podendo levar a contaminação dos ecossistemas aquáticos e também afetar a saúde humana. Uma nova técnica onde se reutiliza os resíduos de plásticos e os convertem em materiais porosos de alto valor que podem ser usados como adsorventes para o tratamento de águas residuais, foi estudada. Assim, é possível estabelecer novos métodos de purificação de água e aproveitamento de resíduos plásticos. Por exemplo, os resíduos de EPS podem ser convertidos em materiais de carbono por carbonização, que é o principal método de tratamento atual para EPS, e esses materiais podem ser aplicados em catalisadores, baterias de íons de sódio e na remoção de poluentes (HU et al., 2019). Segundo os autores, o EPS combinado com lodo de esgoto por meio de pirólise pode obter esferas ocas de carbono que podem ser usadas na remoção de azul de metileno (AM) em águas residuais. Misturas de resíduos como polipropileno, polietileno e poliestireno quando transformados em nanofolhas de carbono (CNS) podem também remover AM das águas residuais. Porém essa conversão de EPS em carbono requer uma grande quantidade de energia, o que leva a um alto custo, portanto, esse método é limitado em aplicações industriais. Recentemente, polímeros orgânicos porosos (POPs) têm sido amplamente aplicados na remoção de poluentes orgânicos e são considerados como adsorventes para tratamento de água. Nesse trabalho foi estudado dois tipos de POPs para remover esses poluentes, EPS-dimetil acetal (FDA) e EPS-cloreto cianúrico (CC). Os resultados apresentaram um novo caminho para a utilização de resíduos plásticos em circulação e forneceu também uma abordagem fácil e ecológica para a preparação de materiais promissores no tratamento de poluentes orgânicos.

Sułkowski et al. (2012) estudaram um novo método para retirar metais pesados da água usando PS reciclado. Na remoção de íons metálicos de forma eficaz em águas residuais são utilizados métodos como precipitação e troca iônica. Para obter trocadores iônicos, a sulfonação de PS virgem e resíduos de EPS foram obtidos usando ácido sulfúrico de sílica. O uso do agente de sulfonação facilita a separação do polímero do ácido e do solvente. Cátions de cobre (Cu) e zinco (Zn) foram estudados e experimentos de adsorção que dependem do tempo de contato, pH, temperatura e dosagem do adsorvato foram realizados. A estabilidade da resina para adsorção cíclica e regeneração também foi investigada. Na preparação do ácido sulfúrico de sílica foi utilizado gás HCL sobre solução de adsorção, sílica em gel seca 160 °C (tamanho de partícula de 2-7 mm). O ácido clorossulfônico foi adicionado ao longo de um período de 30 min à temperatura ambiente. Os substratos foram misturados com uma quantidade constante de sílica gel: 4,5 g-1 mL de ácido clorossulfônico. Depois de completar a adição do gel de sílica,

a mistura foi agitada por pelo menos 3h e em consequência, ácido sulfúrico de sílica foi formado. O derivado de PS foi lavado com água e secado para retirar H_2SO_4 . A grande vantagem desse método foi que os derivados sulfonados de PS foram facilmente separados e avaliados a partir de ácido sulfúrico de sílica por filtração e de solvente por decantação. As resinas foram lavadas com solução de HCl. Em seguida, as resinas de hidrogênio foram lavadas com água destilada para remover o excesso de ácido. A caracterização das resinas obtidas foi feita por análise dos espectros de FTIR. Verificou-se que a porcentagem de adsorção de íons metálicos aumentou com dosagens de resina mais altas para uma determinada concentração inicial e o percentual de adsorção se aproximou de 100% para 0,2 g de resina para ambos os íons metálicos adsorvidos. Isto pode ser explicado pelo fato de que a quantidade crescente de adsorvente fornece um maior número de sítios de adsorção para uma concentração inicial fixa de soluto. Os resultados ainda mostraram que, a adsorção de íons de metais pesados é rápida inicialmente até 15 min, então continua a uma taxa muito mais lenta para alcançar um valor máximo em cerca de 30 min para ambos os íons metálicos. A adsorção de íons metálicos diminui sob condições altamente ácidas para as resinas obtidas. Os resultados experimentais sugeriram que a ligação de íons de cobre é ligeiramente mais dependente da temperatura do que os íons de zinco. A adsorção máxima de cobre aumenta na faixa de temperatura de 20 a 40 °C. A 40 °C, o máximo a adsorção total desse metal atinge seu máximo. Acima 40 °C, a dessorção de íons de cobre prevalece sobre a adsorção. O estudo mostra que a resina de troca catiônica de resíduos de PS pode ser usada como um adsorvente eficiente para a remoção de íons de metais pesados da água.

Siyal et al. (2012), estudaram a reciclagem de EPS como forma de retirar poluentes fenólicos que são encontrados em águas residuais como resultado de processos industriais. Os resíduos de EPS foram reciclados quimicamente para uma nova superfície funcional de PS-hidrazona por acetilação de PS e depois condensação com fenilhidrazina. Em síntese, 3,0 g de EPS foram dissolvidos em 100 mL de carbono tetracloreto (CCl_4). A solução foi filtrada para remover impurezas insolúveis por filtração simples. O filtrado em frasco redondo continha 3,35 g de anidro cloreto de alumínio seco ($AlCl_3$) e 1,98 mL de acetilcloreto (CH_3COCl) foi adicionado gota a gota com agitação e refluxada por 50 min a 60 °C. A mistura de reação foi estabelecida à temperatura ambiente e tratada com 0,05 N de HCl. Acetil-PS foi removido por filtração, lavado com bicarbonato de sódio 1,0 N ($NaHCO_3$) solução para remover o excesso de ácido, lavada com água desionizada para remover a base e seca ao ar. E 3,0 g de acetil-PS foi levado em frasco contendo 50 mL de água destilada acidificada e aquecida por 30 min a 50 °C. Após 2,02 mL de fenilhidrazina foram adicionados à reação mistura e refluxo por 60 min a

50 °C. O produto final, PSH, foi removido por filtração, lavado com água desionizada e Ar seco. A superfície sintetizada foi caracterizada por espectroscopia de infravermelho (FTIR) e análise elementar. A otimização da sorção multivariante foi alcançada por planejamento fatorial aproximação. 99,93% de fenol foi removido da solução aquosa. O estudo FTIR mostrou o envolvimento do nitrogênio da hidrazona porção da superfície sintetizada para a absorção de fenol através da ligação de hidrogênio. A superfície de PS-hidrazona funcional sintetizada foi aplicada com sucesso para o tratamento de fenol em águas residuais industriais contaminadas. Este estudo fornece uma a solução de problemas de gestão de resíduos causados por resíduos de EPS juntamente com tratamento de água contaminada com fenol.

León-Condés et al. (2019) realizaram um estudo para melhorar a remoção de corante índigo carmim em águas residuais têxteis, utilizando resíduos de EPS sulfonado e irradiado (denominado iS-WEPS) foi utilizado como suporte de nanopartículas de óxido de ferro. Esse sistema composto foi denominado (FeO-NPs + iS-WEPS). Neste trabalho, nanopartículas de óxidos de ferro foram obtidas a partir de extratos de chá verde e em seguida, utilização de resíduo de EPS sulfonado e irradiado. Tais compósitos foram usados como um catalisador, para a remoção do corante índigo carmim em efluentes têxteis. Além disso, foram estudadas as isotermas e cinéticas de adsorção, e além da remoção do corante a demanda química de oxigênio (DQO) também foi analisada. Os resultados mostraram que não houve evidências de alterações em sua estrutura química de acordo com a caracterização de FTIR, ou seja, os espectros não apresentaram picos diferentes em relação aos irradiados e nenhuma ligação química foi produzida após irradiação. O grau de sulfonação de resíduos não irradiados (WEPS) e de EPS de resíduos irradiados (iWEPS) apresentaram comportamentos bem definidos. O grau de sulfonação aumenta com o aumento da dose de radiação, até 200 kGy. Isso pode ser atribuído à cisão das cadeias poliméricas, que favorecem o processo de sulfonação. O valor para WEPS não irradiado foi de 23,5%, enquanto para irradiado a 200 kGy foi de 46,6%. Isso significa uma melhoria de 50%. Em doses superiores a 200 kG, o grau de sulfonação diminui gradativamente, até 8,8%, o que pode ser atribuído a uma maior cisão das cadeias poliméricas. A porcentagem de remoção do corante índigo carmim alcançada pelo compósito (FeO-NPs + iS-WEPS) foi de 6% e pelo H₂O de 14%. No entanto, a combinação de ambos seguindo um processo de Fenton, atingiu 99% de remoção. Os resultados mostram diminuição da demanda química de oxigênio (DQO) de 2.422 mg/L para 411 mg/L com um tempo de reação de 20 min, ou seja, uma redução de 83%. A alta eliminação do corante foi devido aos radicais reativos produzidos no processo Fenton. Além disso, a remoção completa do corante nem sempre significa mineralização

completa, pois os efluentes têxteis são sempre uma mistura complexa de produtos químicos. Os resultados dependem das características das águas residuais têxteis.

Calder, Roy e Wang (2018) visando a problemática relacionada a emissões de motores a diesel, avaliaram um método de dissolução de EPS no biodiesel combinado com estabilizador de combustível, acetona. O biodiesel utilizado foi produzido com óleo de canola puro, baixo teor de enxofre, metanol, hidróxido de sódio, EPS e acetona pelo processo de transesterificação. Este estudo utilizou 50 g/L de EPS/biodiesel para preparar misturas de combustíveis da série EPS, considerando estudos já realizados anteriormente. O teor de acetona considerado foi de 100 ml/L de biodiesel para preparar as misturas de EPS/biodiesel. Três amostras foram analisadas, biodiesel-diesel, biodiesel-diesel com EPS dissolvido e biodiesel-diesel com EPS dissolvido e acetona. Um motor a diesel de 2 cilindros com injeção direta foi usado para esta investigação e o motor foi testado em três velocidades de motor diferentes: baixa (1000 rpm), média (2100 rpm) e alta (3000 rpm). A análise de emissão foi conduzida para óxidos de nitrogênio (NOx), opacidade da fumaça, e monóxido de carbono (CO). Em 50 °C, o EPS foi considerado completamente dissolvido em menos de 20 min. Descobriu que quando o EPS tratado termicamente se dissolveria completamente, mas quando o combustível misturas resfriadas, algum EPS se dissolverá. Acetona com ebulição ponto de 56 °C e calor latente de evaporação de 518 kJ/kg era considerado o melhor estabilizador por vários estudos. Um motor a diesel refrigerado a ar, 2 cilindros, 4 tempos foi utilizado. Em todas as condições de rpm, biodiesel com EPS e acetona mostra graduação diminuição no consumo de energia do freio (BSEC), e quanto maior o percentual de biodiesel, os valores diminuem. B50 com EPS e acetona alcançou o BSEC mais baixo, que é aproximadamente 5 e 6% menor em média do que o BSEC do diesel de petróleo. Portanto, maior biodiesel porcentagem com EPS e acetona teve melhor BSEC do que diesel em todas as condições do motor, que provou ser uma mistura de combustível promissora neste motor diesel. Todas as misturas com biodiesel, EPS e acetona teve melhor desempenho do que o diesel puro. Isso pode ser devido ao maior teor de oxigênio do biodiesel e melhor volatilidade da acetona. O aumento no teor de biodiesel causou aumentos nas emissões de NOx, devido ao conteúdo de oxigênio no biodiesel. No entanto, B50 dissolvido em EPS com ou sem acetona emite 21% e 30% menos NOx do que o diesel. Misturas de B50 dissolvidas em EPS com ou sem acetona geram um aumento significativo nas emissões de fumaça. A redução média de CO com B50 em comparação com o diesel é aproximadamente 8%. O maior teor de biodiesel nas misturas produziu menores emissões de CO, que é atribuído ao conteúdo de oxigênio no biodiesel. EPS - B20 dissolvido e B50 com ou sem acetona mostraram o menor emissões de CO, que podem ser devido a uma combinação de efeitos dessas

misturas devido ao maior valor de aquecimento do EPS, maior volatilidade da acetona e teor de oxigênio do biodiesel. Os resultados comparados com o diesel e demonstraram que em geral, o EPS dissolvido com ou sem acetona produziu menos monóxido de carbono (CO) e óxidos de nitrogênio (NO_x).

Gutiérrez et al. (2016) estudaram a redução da pegada de carbono por meio de reciclagem de PS via incorporação de CO₂, uma vez que, a reciclagem de resíduos é considerada como uma nova rota de evitar as emissões do efeito estufa e serve também como matéria prima na fabricação de outros produtos. Vantagens técnicas, ambientais e econômicas da reciclagem de resíduos de PS foram avaliados, enquanto o CO₂ poderia ser recirculado durante o processo em vários ciclos a fim de minimizar seu consumo, enquanto há um aumento do lucro econômico. Poliestireno, Limoneno e dióxido de carbono foram utilizados na preparação desse processo. As espumas celulares obtidas através desse processo de reciclagem de resíduos de PS usando CO₂ como anti-solvente, foram caracterizadas por meio de MEV para determinar o tamanho e a estrutura das células. A rentabilidade da recuperação de CO₂ em relação aos critérios econômicos foi estudado em dois cenários diferentes, que foram realizados de acordo com a população da região e as taxas dos resíduos de PS produzidos por habitante na Espanha. As vantagens técnicas, ambientais e econômicas da reciclagem de resíduos de poliestireno foram avaliadas em planta industrial e em escala piloto considerando que o CO₂ poderia ser recirculado durante o processo em vários ciclos, a fim de minimizar seu consumo enquanto o lucro econômico é maximizado. Os resultados foram considerados viáveis, segundo os autores, e os produtos reciclados apresentaram um aperfeiçoamento em relação as propriedades em comparação com os resíduos.

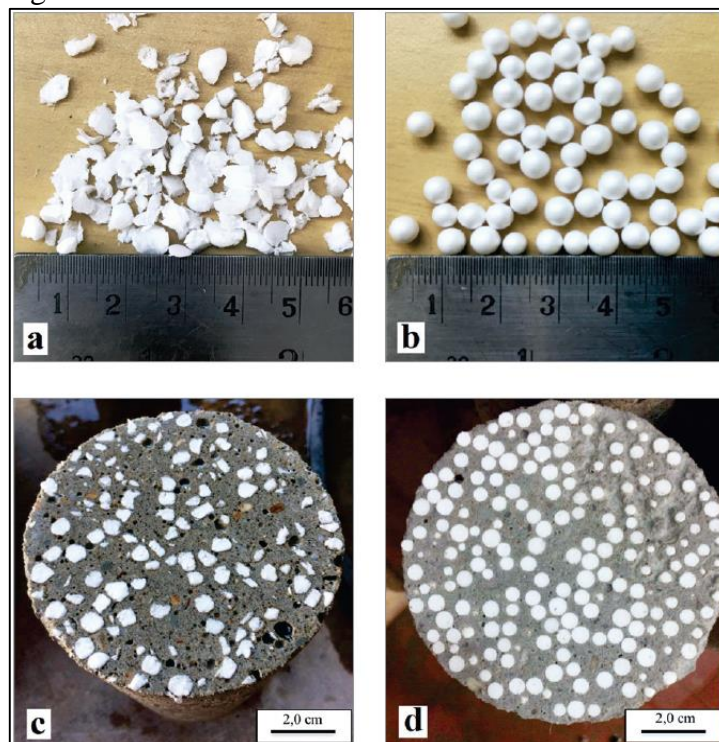
5.1.2 Reciclagem de EPS e posterior aplicação na construção Civil

Carvalho e Motta (2019) estudaram as propriedades de concretos leves com adição de EPS para aplicações em paredes estruturais (veja a Figura 9). Segundo os autores o EPS sendo um material produzido em grande escala e com baixa densidade, produz um grande volume de resíduos. Esses resíduos não são reaproveitados, principalmente no Brasil. O EPS utilizado foi de dois tipos, pérolas e reciclado. Nos concretos do tipo A, foi substituído todo o volume de agregado graúdo (brita) pelo o EPS. Já nos concretos do tipo B, além da substituição adotada no concreto tipo A, houve incremento de EPS em substituição parcial ao volume correspondente de agregado miúdo (areia). Os resultados foram comparados aos de concretos sem substituição da brita por EPS. Verificou-se a influência da adição do EPS em algumas propriedades do

concreto, utilizando-se corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura. Foram ensaiadas amostras no estado endurecido para a determinação da resistência à compressão, absorção total e massa específica e absorção capilar. Foram avaliadas a consistência e massa específica no estado fresco. Todo o processo foi realizado em laboratório de acordo com as normas brasileira em vigor. O programa experimental desenvolvido foi dividido nas seguintes etapas: escolha e caracterização dos materiais constituintes das misturas, escolhas dos traços, moldagem dos corpos de prova e de placas de concreto, ensaios de caracterização do concreto nos estados fresco e endurecido e ensaio térmico.

Para realizar uma comparação do desempenho do concreto com a adição de EPS em pérolas e reciclado, fabricou cinco tipos de concreto, um controle sem adição de EPS e outras quatro amostras com duas porcentagens diferentes de EPS. O mecânico (resistência à compressão) e propriedades físicas (densidade, vazios, absorção por imersão e capilaridade) foram avaliadas, e os testes foram realizados para avaliar o desempenho térmico das misturas estudadas.

Figura 9: Partículas de EPS reciclado



Fonte: Carvalho e Motta (2019)

Nota: a) Partes de EPS reciclado.

b) Pérolas de EPS.

c) Concreto com EPS reciclado.

d) Concreto com pérolas EPS.

No concreto de referência, entretanto, a absorção por capilaridade e propriedades térmicas foi melhor nos concretos com EPS (CARVALHO E MOTTA, 2019). Os autores concluíram que é viável substituir o EPS em pérolas por EPS reciclado, devido aos resultados próximos encontrados. Aminudin et al. (2011) e Maharana, Negi e Mohanty (2007) fizeram uma revisão sobre a reciclagem de EPS, uma técnica simples e de baixo custo que também abordaram o uso de resíduos de EPS na construção civil. O EPS, material derivado do processo de destilação do petróleo bruto e 100% reciclável, é um material de construção alternativo. O uso de material EPS reduz a taxa de extração de materiais naturais, como madeira e pedras, do meio ambiente, promovendo o desenvolvimento sustentável. Como o EPS é formado por aproximadamente 95% a 98% de ar, funciona muito bem no desenvolvimento desse material (CARVALHO E MOTTA, 2019).

Herki e Khatib (2015) e Pavlu et al. (2019) também examinaram as propriedades de engenharia de concretos agregados leves incorporando um novo agregado baseado em EPS. O agregado de concreto produzido por Herki e khatib (2015), denominado Poliestireno Estabilizado (SPS), tinha 80% de resíduos de EPS, 10% de argila e 10% de cimento. A mistura de controle teve uma proporção de 1/6 (cimento e agregado natural). Nas misturas 2, 3 e 4, o agregado natural foi substituído por 30, 60 e 100% (por volume) de agregados SPS, respectivamente. Os corpos de prova foram fundidos em moldes de aço e após fundição foram cobertos e deixado em laboratório por 24h. A influência da crescente incorporação de SPS na trabalhabilidade, densidade, resistência à compressão, resistência à flexão, velocidade de pulso ultrassônico, retração de secagem, expansão e absorção de água de diferentes concretos foi investigada. Os resultados mostraram que o uso de SPS permitiu reduzir a densidade do concreto em 8 - 52% em comparação com a do concreto controle. A redução da densidade deveu-se ao aumento da porosidade total nos concretos leves, que também induziu maior absorção de água, retração por secagem e expansão. Os concretos contendo alto teor de SPS (60-100% SPS) podem ser usados em diferentes aplicações atuais da indústria da construção para concretos de baixo grau e podem ser usados na produção de tijolos com baixa condutividade térmica.

Petrella, Di Mundo e Notarnicola (2020) analisaram características de argamassas de cimento com a utilização de EPS. O objetivo era criar um material ambientalmente sustentável com baixa massa específica, propriedades isolantes e caracterizadas por altos desempenhos técnicos em termos de hidrofobia, baixa absorção de água e com um processo de fabricação de baixo custo. As amostras foram preparadas por meio da substituição parcial do agregado de areia convencional por EPS. Esses compósitos termoisolantes leves podem ser usados na

indústria de construção como componentes não estruturais, com referência específica para aplicações nos interiores (painéis, rebocos). Além disso, os autores ressaltam que, esses conglomerados podem ser considerados ambientalmente sustentáveis porque são preparados com matérias-primas secundárias, EPS reciclado e são econômicos pois a rota de preparação foi usada uma vez que os agregados renováveis não foram pré-tratados e técnicas complexas de produção não era necessária. Levando-se em conta o grande volume pelo EPS ocupado, entende-se que, quanto mais opções de reciclagem forem disponibilizadas, maior poderá ser o seu aproveitamento. Esse método de reciclagem para o EPS oferece um processo simples de transformação do resíduo em um produto de grande valor econômico, intensamente consumido e de elevada importância para a construção civil.

Pavlu et al. (2019), assim como Petrella, Di Mundo e Notarnicola (2020) estudaram a produção de concreto utilizando resíduos de EPS, visando reduzir recursos primários na produção desse produto em estudo e destina-se à aplicação em estruturas de paredes de alvenaria sem argamassa. Um dos objetivos foi obter um produto contendo materiais reciclados, considerando o consumo de recursos naturais, bem como os níveis de propriedades mecânicas e térmicas. Foram preparadas 10 misturas de concreto e testadas a fim de verificar as propriedades do concreto, feito com agregado de alvenaria reciclado. Um deles era uma mistura de referência com um agregado natural, e outras misturas continham agregado de alvenaria reciclado e EPS reciclado em diferentes proporções como uma substituição parcial ou total do agregado natural. Propriedades mecânicas e térmicas foram analisadas. Os resultados demonstraram que, o uso de agregado de alvenaria reciclado levou a melhores propriedades térmicas, mantendo propriedades mecânicas suficientes. A adição de EPS reciclado não afetou significativamente as propriedades térmicas do concreto, porém as propriedades mecânicas diminuíram. O concreto agregado reciclado tem maior absorção de água em comparação ao concreto convencional, nesse estudo obteve uma absorção duas vezes maiores. A condutividade térmica do concreto com agregado de alvenaria reciclado foi de aproximadamente 70% inferior ao valor do concreto de referência com apenas um agregado natural. A utilização de 30% de EPS reciclado para a mistura de concreto com agregado de alvenaria reciclado diminuiu ainda mais a condutividade térmica em cerca de 5%. A capacidade térmica do volume do concreto contendo os dois tipos de materiais reciclados foram semelhantes à capacidade de calor do volume do concreto com agregado natural. No entanto, a diminuição da condutividade térmica do concreto agregado reciclado depende da relação de substituição do agregado de alvenaria reciclado no concreto. Essa dependência se aplica ao tipo de fração de agregado reciclado. Uma

possibilidade é usar esse material para a produção de concreto para alvenaria sem argamassa para edifícios baixos sem elevados requisitos de propriedades mecânicas e durabilidade.

Werncke Silva et al. (2020) estudaram a reutilização de resíduos de EPS para produção e aplicação em impermeabilização na construção civil. A pesquisa foi realizada através de experimentos e testes em campo. O material coletado passou por um processo de limpeza com água e sabonete. Além do EPS foi utilizado como soluto, a adição de cola PVA e fibra de vidro foram testados e também óleo de soja. Foram feitos 4 tipos de amostras: EPS - solvente, EPS - solvente - óleo de soja - cola PVA, EPS - solvente - querosene e EPS - solvente - fibra de vidro. Inicialmente, vários solventes foram testados para analisar aquele que tem o melhor desempenho na dissolução do EPS. Dissolução feita com álcool e querosene não obtiveram resultados satisfatórios. As amostras foram testadas em tecidos, telhas e paredes rebocadas. Todos os testes realizados com as diferentes misturas apresentaram características de acordo com sua composição, estas apresentaram resultados satisfatórios antes da umidade. O uso da cola PVA e do óleo influenciaram tanto na cor quanto na resistência da água, entre as quatro misturas foi a que apresentou menor resistência. As amostras três e quatro foram as que apresentaram melhor resultado, a amostra três apresentou coloração transparente e excelente resistência a umidade e a mistura quatro apresentou ganho de resistência devido a presença de fibra. O trabalho apresentou resultados positivos capaz de proteger os elementos e componentes de edifícios contra as ações nocivas da água.

5.1.3 Métodos de reciclagem de EPS por dissolução

Outro meio de utilizar o EPS na reciclagem por dissolução de acordo com Liu e Liu (2014), foi a utilização de resíduos de EPS como matéria prima para uma série de corantes azo poliméricos, por meio de clorossulfonação, hidrólise, reações de amidação, diazotização e acoplamento. Vários grupos funcionais, como nitro, bromo, por exemplo, podem ser facilmente inseridos na estrutura da molécula de PS pelo uso do alto reatividade do anel de benzeno na cadeia de PS via nitração, halogenação, etc. Portanto, muitos polímeros funcionais podem ser obtidos usando resíduos de EPS como matéria-prima para algumas reações químicas. Em comparação com a reciclagem térmica, a conversão de EPS em produtos de polímero funcional de alto valor úteis são mais valiosos por modificação química (LIU; LIU, 2013). Corantes poliméricos possuem vantagens sobre os corantes orgânicos de baixo peso molecular, como alta resistência a solventes e resistência ao calor, excelentes propriedades de processamento e baixa toxicidade. Os corantes azo são a classe mais importante de tintas sintéticas, respondendo

por mais da metade delas. Estes tipos de corantes preparados são promissores e podem ser utilizados em plásticos e materiais de fibra. As propriedades de absorção de UV-Vis, solubilidade e térmica propriedades desses corantes azo poliméricos foram estudadas. Os resultados obtidos mostraram que, a conversão de resíduos de EPS em corantes azo poliméricos podem ser aplicados e servem de grande benefício para proteger o meio ambiente e no desenvolvimento de recursos que sejam sustentáveis.

Min et al. (2019) estudaram a utilização de resíduos de PS na produção de flocos de carbono poroso (PCFs) e sua aplicação em um supercapacitor. Para a síntese de PCF, 2 g de MgO em flocos e 0,2 g de PS foram misturados e inseridos em uma autoclave. A autoclave foi selada e aquecida a uma taxa de 20 K/min e depois mantida a 973 K por 2 h. Após o esfriamento a temperatura ambiente, amostras sólidas foram coletadas e, em seguida, misturadas com HCl diluído para remover MgO. As misturas foram filtradas e enxaguados várias vezes com água deionizada e o PCF foi então seco a vácuo. Para a preparação de híbrido PCF-MnO₂, os PCFs obtidos (10 mg) e KMnO₄ (5 mg) foram dispersos em etanol à temperatura ambiente. Após filtrar e enxaguar várias vezes com água deionizada e etanol, o produto sólido PCF-MnO₂ foi então secado em um forno a vácuo. Foram realizadas análises de morfologia e microscopia eletrônica, difração de raios X (XRD), e dados de TGA também foram verificados. Os materiais resultantes mostraram alta capacidade elétrica em dispositivo supercapacitor. Demonstrando, assim, um método que seja conveniente para a preparação de material de eletrodo, econômico e de alto desempenho. É importante dizer que, esse método de reciclagem de PS fornece um produto de alto valor, e que é utilizado em grande escala (MIN et al., 2019).

Yang et al. (2018) propuseram um estudo sobre a utilização de resíduo de grafite e EPS para a preparação de uma placa de espuma reciclada de grafite. A placa de espuma de resíduos de grafite e EPS (wGEPS) foi lavada com água, e em seguida, cortada em pedaços menores. Foi feita uma solução dissolvendo wGEPS em diclorometano (DCM). Posteriormente, foi adicionada à solução aquosa de Dodecil sulfato de sódio (SDS). A fim de obter grânulos espuma reciclada de grafite/expandida (rGEPS), pentano foi usado como agente espumante e infiltrado em grânulos de grafite/poliestireno (GPS). Devido ao baixo ponto de ebulição (39,8 °C) do DCM, este pode ser reciclado por condensação quando o sistema for aquecido acima de seu ponto de ebulição. O SDS aquoso também pode ser reciclado após filtrar o GPS. Como objetivo de obter grânulos rGEPS, pentano foi usado como agente espumante e infiltrado em grânulos de GPS. Espectros de FTIR, análises de MEV, TGA e XRD foram realizadas, a fim de caracterizar as amostras. Testes de absorção de água, densidade aparente, testes de resistência à flexão e testes de resistência à compressão também foram realizados. As análises realizadas

de grânulos de rGEPS mostraram que as propriedades não foram deterioradas. Os resultados de FTIR indicaram que os principais grupos funcionais de poliestireno não são destruídos após a reciclagem. A intensidade dos picos de difração de grânulos rGEPS mostraram ser o mesmo do wGEPS, indicando que o grafite existe em grânulos rGEPS após o processo de reciclagem e sem perdas, o que confirma ainda mais que o método de dissolução do solvente pode ser usado para reciclar o wGEPS. As análises de TGA indicaram que as rGEPS têm uma perda de peso durante 362 - 463 ° C. Antes de 362 ° C, a perda de peso é de cerca 5%, o que é relevante com baixo peso molecular polímeros. Cadeias de PS se quebram em cadeias curtas e, em seguida, despolimeriza para baixo peso molecular polímeros com temperatura superior a 362 ° C; portanto, o peso tem uma grande diminuição. Não houve perda de peso óbvia quando a temperatura é mais alta de 463 ° C, o que significa que o resíduo é principalmente grafite. Fotografias ópticas do wGEPS e placa de espuma rGEPS, mostraram que não há diferença entre ambos, exceto o tamanho da célula. Não há nenhuma diferença óbvia na estrutura entre espuma EPS e espuma GEPS. O mais interessante é que o solvente gasto também pode ser reciclado, o que torna esse processo mais econômico e nos fornece uma nova ideia para reciclarmos materiais wGEPS.

Mumbach et al. (2019) investigaram a dissolução de resinas adesivas presentes em filmes de poliolefina. O processo de dissolução foi feito pelo uso de acetato de etila. O objetivo era separar e caracterizar filmes de poliolefina de resíduos sólidos plásticos. As propriedades químicas dos materiais foram caracterizadas por técnicas de FTIR, TGA, Calorimetria de Varredura Diferencial (DSC) e Análise Mecânica Dinâmica (DMA). Os resultados mostraram que o material recuperado manteve sua química, propriedades térmicas e mecânicas. Este processo indica possível viabilidade econômica considerando a demanda desses resíduos, e o investimento necessário para ser implementado no processo de reciclagem que poderia ser amortizado em um curto período de tempo. Além disso, o solvente orgânico usado no processo de dissolução pode ser recuperado posteriormente por destilação.

5.1.4 Reciclagem de EPS por dissolução em solvente natural

Para a reciclagem de EPS, o tratamento com solvente é indicado para reduzir o volume e ser remodelado posteriormente (GIL-JASSO et al., 2019; HATTORI, 2015). O processo de fusão é simples, mas provoca degradação química e não pode evitar degradar a qualidade do PS original, no entanto, o tratamento com solvente é, em muitos aspectos, mais desejável para um sistema de reciclagem eficaz (HATTORI, 2015). Há vários solventes para PS, por exemplo,

hidrocarbonetos, halogenetos de alquila, aromáticos, ésteres e cetonas, porém os solventes à base de petróleo não são favoráveis ao meio ambiente global (GIL-JASSO et. al., 2019; HEARON et al., 2014).

Os óleos naturais são compostos principalmente de terpenos, sesquiterpenos e compostos aromáticos. Os terpenos desempenham papéis nos mecanismos de defesa das plantas e para atrair insetos para a polinização. Os terpenos são a causa dos cheiros agradáveis bem conhecidos, picantes sabores e propriedades farmacológicas (GIL-JASSO et. al., 2019). O limoneno é um componente dos óleos cítricos e é um dos terpenos mais estudados na dissolução de PS (GIL-JASSO et. al., 2019; HEARON, 2014; HATTORI, 2015).

Hattori (2015), estudaram a reciclagem de PS por solvente natural. O artigo traz a relação da estrutura química e o poder de dissolução do PS. As propriedades do PS reciclado são comparadas com as do PS original. Os autores observaram que, já que o Limoneno é um dos terpenos, outros monoterpenos e terpenóides também dissolva o PS. O terpeno é um hidrocarboneto biomolecular cuja espinha dorsal estrutural possui uma unidade de isopreno (GIL-JASSO et. al., 2019). Correspondendo ao número de uma unidade de isopreno, eles são chamados de monoterpeno (C_{10}), sesquiterpeno (C_{15}), diterpeno (C_{20}), sesquiterterpeno (C_{25}) e assim por diante. Muitos dos monoterpenos são líquidos à temperatura ambiente e são os principais componentes dos óleos essenciais (HATTORI, 2015). Todos esses terpenos são capazes de dissolver valores significativos de PS, que são maiores do que o do tolueno, que é um dos solventes derivados do petróleo para o PS. Sendo assim, esse método demonstrou ser uma forma mais ecológica de fazer a dissolução desse resíduo (HATTORI, 2015).

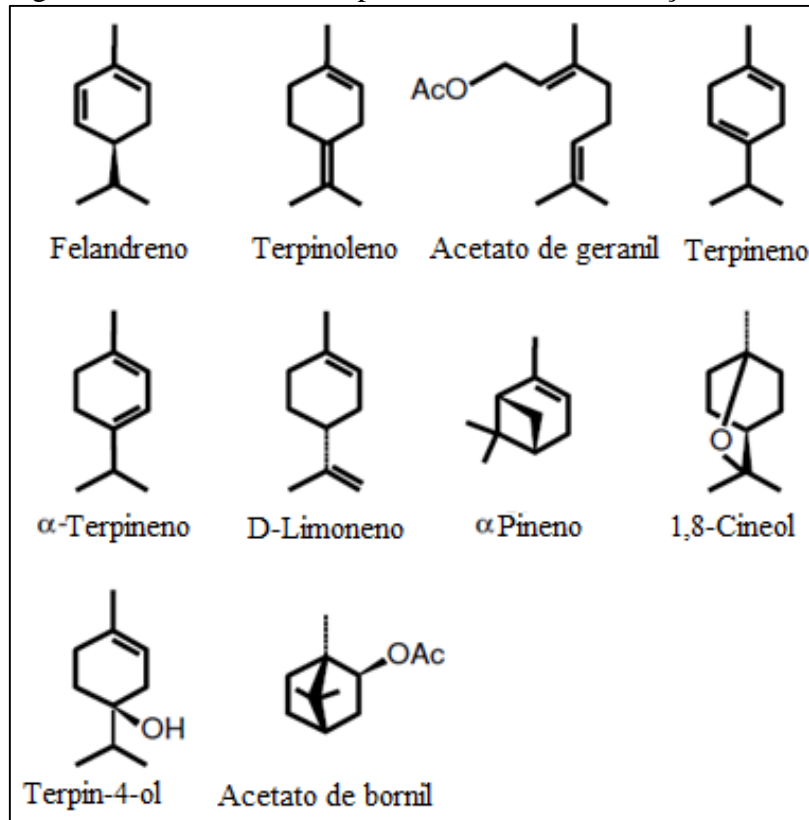
O d-limoneno dissolve as mesmas quantidades de resíduos de EPS como alguns solventes orgânicos, mas tem os problemas de baixo rendimento e também alto custo de extração. No entanto, o uso de óleos naturais alternativos é uma alternativa promissora e ecologicamente correta para a reciclagem de EPS (HATTORI, 2015; HEARON et al., 2014).

Garcia et al. (2009) estudaram a reciclagem de PS por solventes com o objetivo de reduzir o volume sem ocorrer a degradação das cadeias poliméricas. Vários solventes podem ser utilizados na dissolução, alguns como tolueno e benzeno, porém estes não são ambientalmente corretos pois podem impedir a aplicação deste material reciclado em outros produtos. Então, surge o “solvente orgânico” que evitaria este tipo de problema. O presente estudo relata uma alternativa de dissolução do PS por meio de dissolução em “solvente orgânico”. Os solventes utilizados foram: linalool, geraniol, limonene, terpineno, cymene, felandreno, Mentol, Terpeneol, Cinamaldeído, Eucaliptol. Para selecionar o solvente mais adequado, vários experimentos foram realizados, como determinação da solubilidade, índice de

polidispersão (PDI) e TGA. Os resultados apresentados mostraram que a solubilidade do polímero nestes solventes é afetada pela polaridade do solvente. No entanto, o polímero se dissolve melhor em solventes não polares da classe dos terpenos, que são quimicamente e fisicamente semelhante ao PS.

Hattori et al. (2008), também fizeram um estudo sobre a capacidade de certos monoterpenos de óleos essenciais em dissolver PS (a Figura 10 apresenta a estrutura química destes compostos).

Figura 10: Estrutura dos terpenos usados na dissolução de PS



Fonte: Hattori et al. (2008)

Os autores estudaram os terpenos que constituem os óleos essenciais: *Abies sachalinensis* e *Eucalyptus*. Estes dois óleos essenciais são abundantes e foram avaliados na dissolução de PS. Os fragmentos de PS foram inseridos em um tubo de ensaio com terpeno ou óleo em 30, 40, 50, 60 ou 70 °C. A relação entre a estrutura química dos terpenos e a dissolução de PS foi discutido através de meio de parâmetros de solubilidade e energia de ativação aparente para dissolução. O α-Terpineno e seus isômeros posicionais em uma ligação C=C têm alto poder de solvente para PS, enquanto os monoterpenos bicíclicos estudados são inferiores a este respeito, mesmo que tenham parâmetros de solubilidade semelhantes aos de α-terpineno. Além disso, foi estudado a recuperação do PS e terpenos para sua posterior aplicação. Os resultados

obtidos mostraram que os monoterpenos dissolveram PS em alta concentração. O produto obtido possui diversas aplicações como na geração de polímeros alto resistentes, fabricação de capas protetoras para celular e outras.

Hearon et al. (2014), também estudaram uma solução de EPS utilizando o solvente orgânico d-limoneno. Resíduos de EPS contaminados são imersos em um reservatório contendo d-limoneno. Após a mistura e dissolução do EPS em d-limoneno, forma-se uma bicamada líquida. Através de uma extração básica os contaminantes da camada inferior são drenados e, logo após filtração, uma solução purificada de PS em d-limoneno permanece. A recuperação de PS é realizada pela adição de comonômero de politiol e fotoiniciador e aquecimento subsequente a 140 ° C, o que leva a uma dissolução homogênea de todas as amostras. Essa solução é levada a um molde pré-aquecido e a irradiação UV, causando a formação de uma rede de poli (tioéter), após o qual a separação de fases do PS segue na produção de microfases e/ou nanofases de PS disperso. Polímeros resistentes ao impacto, como por exemplo, capa protetora para telefone celular foi demonstrado neste trabalho, fornecendo assim um potencial de aplicabilidade na indústria.

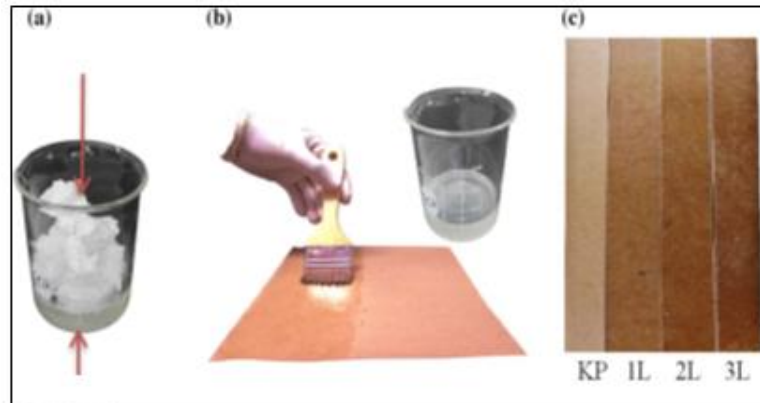
Jimenez-Francisco et al. (2017), visando agregar valor a este polímero reciclado, em vez de continuar o atual costume de descartá-lo em aterros sanitários, também propôs a reciclagem de EPS por meio da dissolução em d-limoneno, para servir como revestimento em papel Kraft (Figura 11) a fim de obter um material com propriedades melhoradas. Três diferentes amostras de EPS-Limoneno foram aplicadas em papel Kraft e analisadas em laboratório. E, a fim de avaliar o efeito do revestimento e as propriedades físicas do papel, diferentes camadas de resina foram aplicadas. A resina foi levada a um forno de a 60 °C por 24 h para processo de secagem. O tempo de secagem ideal foi avaliado em diferentes períodos correspondentes a 2, 4, 24, 36 e 48 h, a fim de determinar o menor tempo. Testes de tração, absorção de água, número de camadas de revestimento compressão, gramatura e densidade foram avaliados. Os resultados mostraram aumento significativo na resistência do papel Kraft com a aplicação de um revestimento de camada de EPS, e também demonstraram o potencial de reciclagem de EPS para obter um produto com boas características hidrofóbicas e forças mecânicas.

Gil-Jasso et al. (2019) relataram um método simples e barato de reciclagem de EPS usando óleos naturais para dissolver o EPS (Figura 12). Uma das vantagens desse método é que ele facilita o manuseio e transporte desse resíduo. As fontes dos óleos naturais estudados foram: anis estrelado, camomila, tomilho e eucalipto. Para cada experimento 1 g de óleo essencial foi colocado em um tubo de ensaio, posteriormente foram inseridas diferentes quantidades de EPS e em seguida foi anotado o tempo de dissolução. A recuperação do PS foi realizada com a

adição de metanol e isopropanol. Já a recuperação do óleo essencial foi feita por um evaporador rotativo a 65 °C. Foi discutido a dissolução máxima, concentração e tempo para cada um dos diferentes óleos estudados. Essa recuperação mostra que tanto o EPS quanto os óleos essenciais podem ser utilizados novamente em outras rotas de reciclagem.

Todos os óleos naturais, EPS, óleo natural com EPS dissolvido e recuperados foram analisados usando FTIR. O espectro de FTIR mostrou que todos os óleos naturais podem ser recuperados na sua forma natural no final do processo, e que eles podem ser reutilizados novamente em novas rotas e dissolução. Os resultados de difração de raios X (XRD) indicaram fases amorfas para todos os EPS que foram reciclados, e que são idênticos aos das amostras de PS não tratadas, confirmando assim, a recuperação bem-sucedida de resíduos de EPS.

Figura 11: Preparação do Kraft



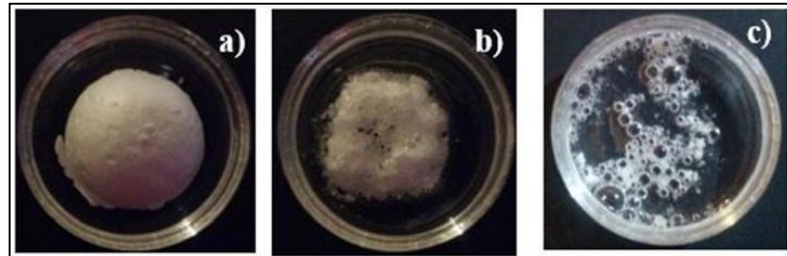
Fonte: Jimenez-Francisco et al. (2017)

Nota: a) Dissolução de EPS.

b) Resina aplicada.

c) Amostra.

Figura 12: Dissolução do EPS por óleo essencial



Fonte: Gil-Jasso et al., 2019

Nota: a) Antes do óleo essencial.

b) Depois de 1 min.

c) Depois de 2 min.

Yadav e Sharma (2017) também estudaram um solvente natural para a reciclagem de PS. O método utilizado foi usar diretamente a casca da fruta cítrica como solvente, simples e barato de preparar o extrato de laranja como solvente de PS. Após remover a casca da laranja junto com a parte branca, esta foi dobrada e pressionada, um extrato foi retirado e armazenado em um frasco. Depois de sedimentar, o extrato de casca de laranja, forma três camadas. A caracterização morfológica dos materiais resultantes desse processo foi avaliada por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Análise de difração de raios X (XRD), TGA, e as partículas do meio foram submetidas a pirólise. Sem novos processamentos, o extrato da casca da laranja pode ser usado como solução para transferência de impressão para uma variedade de substratos, incluindo papel, tecido de algodão, pele e unha. A camada superior pode ser usada para a reciclagem de poliestireno em tecidos, fios e bobinas, enquanto a camada inferior pode ser usada como um solvente para a fabricação de eletrofição, nanofibras de biopolímeros como a gelatina. Camada intermediária do extrato de casca de laranja pode ser pirolisado em carbono e pode ser aplicado como material de eletrodo para armazenamento de energia. Em resumo, este trabalho pôde demonstrar formas inovadoras de converter resíduos de PS em produtos úteis para o bem-estar social e também para aplicações industriais.

O estudo de Sarmiento et al. (2016) apresenta um método para processar EPS reciclado e óleo de palma (WCO) para obter um material com propriedades úteis para diversas aplicações. O trabalho foi motivado com o intuito de levar a redução de resíduos de EPS sem a sua degradação completa por meio de um método simples e de baixo custo. O EPS e o óleo de cozinha foram dissolvidos até a desgaseificação de cada fragmento a uma temperatura de 165 °C sob pressão atmosférica. As amostras foram submetidas a testes morfológicos, químicos e mecânicos. A microscopia foi usada para avaliar a superfície de EPS reciclado, que apresentaram uma superfície semelhante ao EPS, no entanto, alguma heterogeneidade foi observada devido a variações na composição do material. Os espectros da caracterização química (FTIR) mostraram composições semelhantes originadas de EPS e WCO. Os resultados identificaram que o polímero reciclado não apresentou diferença em sua composição química, sendo apenas a mistura simples de EPS e WCO. Além disso, o material obtido sugere um alto potencial e também pode ser utilizado como material de construção.

5.1.5 Reciclagem utilizando compósitos naturais e fibras

Sekharan, Abraham e Thachil (2012) realizaram um estudo por meio de misturas de borracha natural reforçada com sílica (NR) e resíduos de EPS. O EPS foi utilizado para mistura

com NR. As amostras NR/EPS (35/5) foram preparadas por mistura por fusão em um Brabender Plasticorder. Uma vez que NR e EPS são incompatíveis e imiscíveis, um método foi desenvolvido para aumentar a compatibilidade. Para isso, EPS e NR foram inicialmente enxertados com Anidrido Maleico (MA) usando peróxido de Dicumila (DCP) para dar um copolímero de enxerto. O enxerto foi avaliado por IR e estudos de MEV mostraram melhor dispersão de EPS na amostra compatibilizada em comparação com a não compatibilizada. De acordo com as análises, a resistência à tração, alongamento na ruptura, módulo, resistência ao rasgo, deformação à compressão e dureza da mistura foram considerados iguais ou melhores do que os do composto NR preenchido com sílica virgem. Observou-se também que as propriedades térmicas das amostras são equivalentes às do NR natural.

Já os trabalhos de Poletto et al. (2010) e Gutiérrez-Estupiñán, Gutiérrez-Gallego e Sánchez-Soledad (2019) estudaram a reciclagem de EPS por meio de fibras. Poletto et al. (2010) tiveram como objetivo avaliar o potencial da utilização de EPS reciclado e farinha de madeira como materiais para o desenvolvimento de compósitos plásticos de madeira. O resíduo da madeira é gerado em diferentes estágios de processamento e geralmente são depositados em aterros sanitários, lixões e até queimados. A adição de EPS e farinha de madeira geram compósitos viáveis tanto em relação a propriedades mecânicas quanto no ponto de vista ambiental (POLETTO et al. 2010). Os resíduos de EPS obtidos de uma unidade de triagem tinha um índice de fluxo de derretimento (MFI) de 20 g/10 min (200 °C/5 kg), estes produtos de embalagem eletrônica e eletrodomésticos, as embalagens de alimentos não foram utilizadas. O poli (estireno-co-anidrido maleico), SMA, usado como agente de acoplamento foi SMA2000, contendo 30% em peso de grupos anidrido maleico e com peso molecular de 7500 g/mol. A quantidade de agente de acoplamento incorporado foi de 2% em peso. Os resíduos de farinha de madeira usados neste estudo não foram submetidos a qualquer tipo de tratamento preliminar. O EPS foi moldado em uma prensa quente a fim de reduzir a densidade aparente, sem causar degradação ao PS. Posteriormente, o EPS foi triturado em um moinho para se obter flocos com partículas de tamanho 5 -15 mm. A farinha de madeira foi levada a uma estufa a 105 °C por 24 h. As amostras com 10, 20, 30 e 40% (peso) de farinha de madeira com e sem 2% em peso de SMA200 e os flocos de EPS foram processados por uma extrusora. A temperatura foi controlada entre 160 e 190 °C para derreter o resíduo de EPS e não levar a degradação da farinha de madeira. As amostras foram submetidas a testes de tração, testes de flexão e resistência ao impacto e também a testes de densidade. E os estudos sobre a morfologia dos compósitos foram analisadas por MEV. A partir dos resultados esta metodologia foi considerada como uma alternativa promissora para a reciclagem do EPS. As análises de densidade mostraram um

aumento de 25 vezes em comparação ao EPS virgem. Para as amostras que não possuíam o agente de acoplamento os resultados indicaram que as propriedades diminuíram, porém aquelas que foram tratados com o agente de acoplamento apresentaram resultados superiores, isso devido a ligação entre o polímero em estudo e a farinha de madeira. As microscopias das superfícies mostraram que as amostras que não possuíam o agente de acoplamento indicou presença de vazios, essa adesão e melhorada com a adição do agente de acoplamento. Os autores indicam em um estudo futuro fazer análises de absorção de água e espessura que seriam importantes para sua posterior aplicação, como por exemplo, na indústria automotiva.

Tawfik, Eskander e Nawwa (2016) estudaram dois resíduos para formular um composto de madeira dura com valor agregado (HWC). Fibras de palha de arroz lignocelulósico (RS) e resíduos de espuma de EPS, foram utilizados para criar um produto de madeira dura aplicando uma técnica de prensagem a quente. A RS seca ao ar foi adicionada a espuma de EPS fundido em proporções (30 - 70% massa: massa) e a HWC foi submetida a análises de resistência acústica, absorção de água e resistência a tração. De acordo com os dados experimentais, pode-se observar que, quando aumenta o conteúdo da fibra RS o valor da resistência a tração cai cerca de 50% a 70%. No entanto, para melhorar esses valores foi adicionado um valor maior de PS, para formular um compósito adicional de madeira (HWCg). Posteriormente, observou que com o aumento de PS as características de resistência a tração aumentaram, assim como os valores de absorção de água se apresentaram satisfatórios. Sendo assim, esse método mostrou que a utilização de PS e RS podem substituir a madeira natural em muitas outras aplicações diárias. Gutiérrez-Estupiñán, Gutiérrez-Gallego e Sánchez-Soledad (2019) também estudaram a preparação de um material oriundo de compostos naturais, em estudo a fibra de palma e resíduo de EPS para o desenvolvimento de fibras naturais. O material vegetal foi lavado com água para a remoção de impurezas e seco a temperatura ambiente por quatro meses e levado a um moinho de martelo. Para a escolha do solvente foi analisado aquele que apresentava menor toxicidade, o d-Limoneno, foi o escolhido, devido suas características e por ser um solvente natural. As fibras obtidas foram aquecidas a 105 °C por 4 horas para diferentes granulometrias (malhas n.30, n.40, n.50, n.60 e n.70). Cada fração foi armazenada em um saco lacrado. Os aglomerados foram feitos por um processo de moldagem, prensagem e aquecimento. Todos os parâmetros foram mantidos constantes e apenas o tamanho da fibra variava. Os testes de resistência à compressão e dureza mostraram que, para um tamanho de fibra menor, menos dureza, resistência a compressão e rigidez, aqueles feitos com fibras de malha nº 40 apresentou melhor desempenho em testes mecânicos.

Singhal, Ishita e Sow (2019) também estudaram um método de reciclagem de EPS por meio de dissolução através de uma técnica chamada sopro em solução (SBS), esse método facilita o transporte de resíduos de EPS em grande volume. Foram utilizados três solventes acetato de etila, tolueno e N, N-dimetilformamida (DMF), estes que estão sendo utilizados na produção de fibras e na fácil recuperação do solvente. A produção da fibra é demonstrada para os sistemas EPS-solvente usando o processo SBS. Os resultados mostraram que a morfologia da fibra varia para os diferentes sistemas de EPS-solvente. A recuperação do solvente (saindo do SBS) é avaliado utilizando ASPEN Plus. Todos os três sistemas EPS-solvente foram avaliados com sucesso nas fibras produzidas usando o processo SBS. O tolueno produziu fibras uniformes com poucos grânulos, acetato de etila produziu fibras de diâmetros não uniformes com poucos grânulos e DMF produziu fibras com diâmetro maior. Os estudos de recuperação de solvente mostraram que a porcentagem de solvente recuperado que está relacionada a esse processo é determinada em função da entrada de energia necessária dos diferentes parâmetros, incluindo pressão do compressor e alimentação de ar. A simulação mostrou que quanto maior a pressão do compressor e a baixa alimentação é possível obter $> 70\%$ de recuperação do solvente para solventes de alta volatilidade como o acetato de etila e o tolueno. Porém, existem sim perdas significativas de solventes como para o DMF, a recuperação pode ser maior se utilizar uma alimentação de ar para cada solução de polímero, mas o gasto de energia será maior.

Masri et al. (2018) analisaram um estudo de reciclagem utilizando compósitos com base em tamareira e resíduos de EPS. O uso da fibra juntamente com o resíduo polimérico pode melhorar propriedades mecânicas, térmicas e acústicas na construção civil. As propriedades físico, mecânica, térmico e morfológicas foram avaliadas para caracterizar o compósito de folheto de PS. Os folíolos obtidos das folhas de tamareiras foram lavados para remover impurezas em seguida secados naturalmente durante o período de três dias a fim de diminuir o teor de água. Após esse período os resíduos de tamareira foram moídos e peneirados. Um ligante orgânico obtido por meio da dissolução de EPS e gasolina foi utilizado. Testes de flexão e condutividade térmica foram realizados. Para a escolha do peso e proporções a serem utilizados foram feitas preparações iniciais. Primeiramente os compósitos de folhetos de poliestireno foi preparado com proporções de peso de 10 a 15%, porém verificou-se que essas condições levaram a propriedades mecânicas não interessantes. Depois disso, foram realizados testes para proporções de 20 a 30% apresentando uma maior resistência. Ao todo foram realizadas nove combinações de proporções de peso matriz/reforço (30/70, 25/75 e 20/80% em peso) para obter os compósitos e tamanhos de (0.1–0.315 mm, 0.315–0.5 mm e 0.5–1 mm). A

mistura foi submetida a uma pressão de recalque de 10 barras por 10 min para obter uma boa mistura e retirar o ar existente. Após essa compressão as placas obtidas em forma de paralelepípedo foram secadas a temperatura ambiente por 15 dias e cortadas para obtenção de corpos de prova.

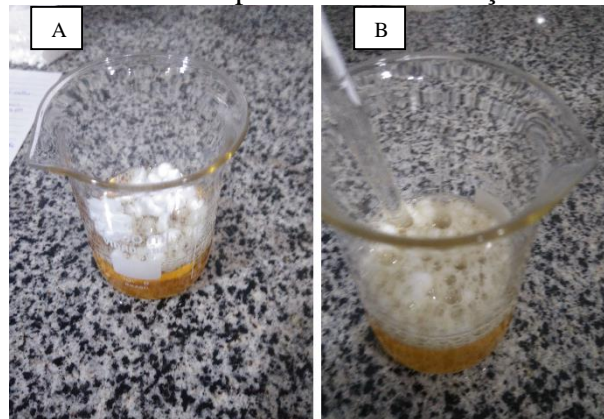
A caracterização desse material foi realizada por meio de análises de densidade, testes de flexão, condutividade térmica, análises de MEV também foram realizadas. Os resultados mostraram que esses materiais possuem densidade próxima a das madeiras o que implica seu uso potencial nessa substituição, principalmente naquelas regiões em que há poucas florestas. Esse material também obteve densidade próxima a placa de fibra média (MDF), madeira compensada e painéis de partículas, por exemplo. Mostrando assim, que as propriedades do EPS e resíduo de tamareira são aceitáveis e podem ser aplicadas em uma variedade de produtos. Os valores dos testes de flexão mostram que são menores em relação a MDF e outros materiais encontrados na literatura, por isso os autores citam a importância de melhorar a preparação na obtenção dos compósitos a fim de garantir resultados que sejam mais satisfatórios em relação a esses testes. Outra alternativa foi citada como o uso de outro material como reforço. Os valores de condutividade térmica mostraram uma semelhança desse compósito com madeiras convencionais. Ainda mostraram que, esse material obtido é 50% mais isolante do que outros compostos semelhantes a base de madeira e EPS encontrados na literatura. As análises morfológicas mostraram que, para preservar as fibras de tamareira e a relação fibra-matriz é necessário uma melhoria no processo de preparação, como por exemplo, é preciso melhorar a pressão e o tamanho do reforço. O material obtido é fácil de reciclar no final de sua vida útil, podendo ser utilizado como isolante na construção civil (MASRI et al., 2018).

5.2 PROCESSO DE RECICLAGEM DO EPS

Com base na revisão da literatura, exposta na seção anterior, iremos aqui apresentar uma proposta de reciclagem do EPS utilizando o d-limoneno como solvente e a recuperação da massa polimérica em meio de óleo de soja residual.

O processo de dissolução começou com a estimativa do percentual ideal de d-limoneno a ser utilizado na dissolução do EPS moído. Conforme apresentado na seção de procedimento experimental, chegou a uma relação ótima de 60 ml de solvente para cada 15 g de EPS fragmentado.

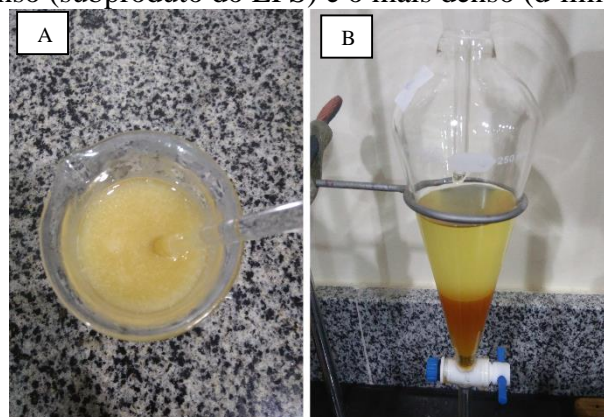
Figura 13: Processo de dissolução do EPS: (A) início do processo de dissolução; (B) metade do processo de dissolução



Fonte: Do Autor, 2021

A Figura 13 apresenta o resultado da dissolução completa do EPS (veja a Figura B). Este processo foi realizado a temperatura ambiente com agitação manual. Ao final da reação, a mistura foi transferida para um funil de separação onde ocorreu a separação do d-limoneno e do EPS dissolvido, que a partir de agora chamaremos de subproduto da dissolução do EPS. A Figura 14 mostra este processo de separação, onde a fase mais densa é o d-limoneno residual e menos densa, e clara, que é o subproduto do EPS. A completa separação das fases durou aproximadamente 24 horas.

Figura 14: Processo de separação: (A) Mistura homogênea EPS e d-limoneno; (B) Separação menos denso (subproduto do EPS) e o mais denso (d-limoneno)

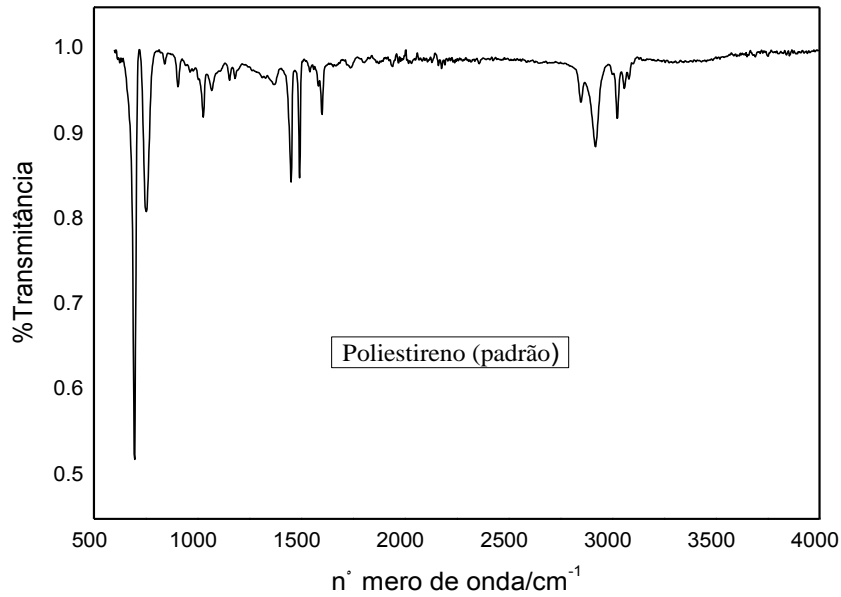


Fonte: Do Autor, 2021

Após a separação das fases da mistura, foi necessário determinar as especificidades químicas presentes em cada uma delas. Para isso, foi utilizada a espectroscopia de infravermelho (FTIR). Esta técnica, através da razão entre a intensidade de luz incidente e transmitida, permite caracterizar os grupos funcionais característicos das substâncias em questão.

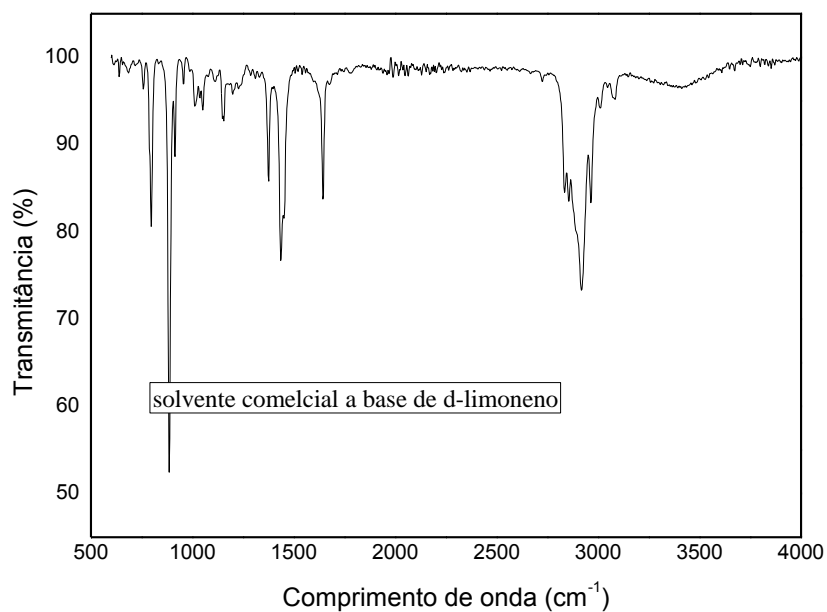
Para fins de comparação as Figuras 15 e 16 apresentam os espectros padrões de infravermelho (transmitância em função do comprimento de onda) para o poliestireno e d-limoneno, respectivamente. Espectros semelhantes são esperados nos casos da presença destes dois componentes.

Figura 15: Espectro de infravermelho padrão para o poliestireno



Fonte: Do Autor, 2021

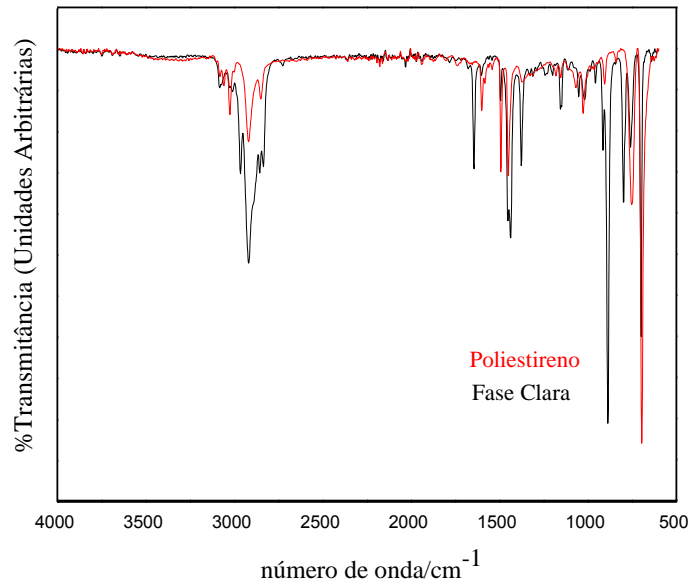
Figura 16: Espectro de infravermelho padrão para o d-limoneno



Fonte: Do Autor, 2021

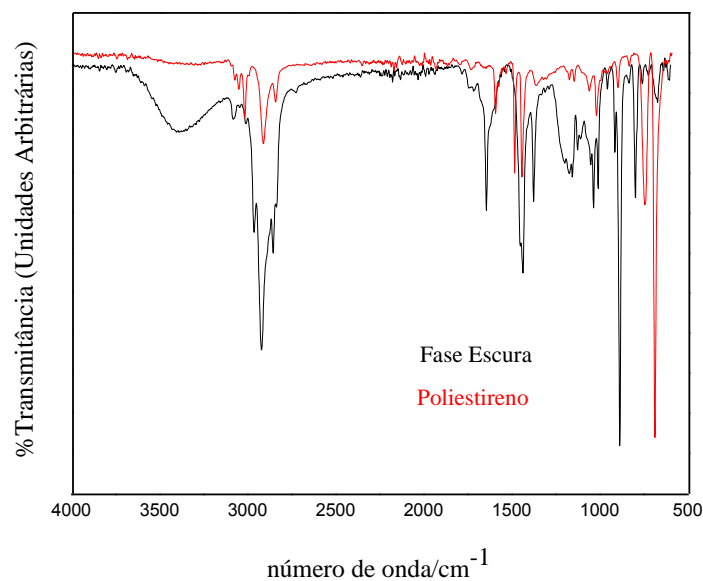
As Figuras 17 e 18 apresentam o espectro de infravermelho (transmitância em função do comprimento de onda) para o poliestireno sólido (o qual passou pelo processo de dissolução, o padrão) e as fases clara e escura, resultantes do processo de dissolução. Podemos observar uma semelhança entre os espectros do poliestireno e o para a fase clara, o que nos indica que realmente temos o poliestireno presente após o processo de dissolução em d-limoneno.

Figura 17: Espectro de infravermelho padrão para a fase clara e o poliestireno padrão



Fonte: Do Autor, 2021

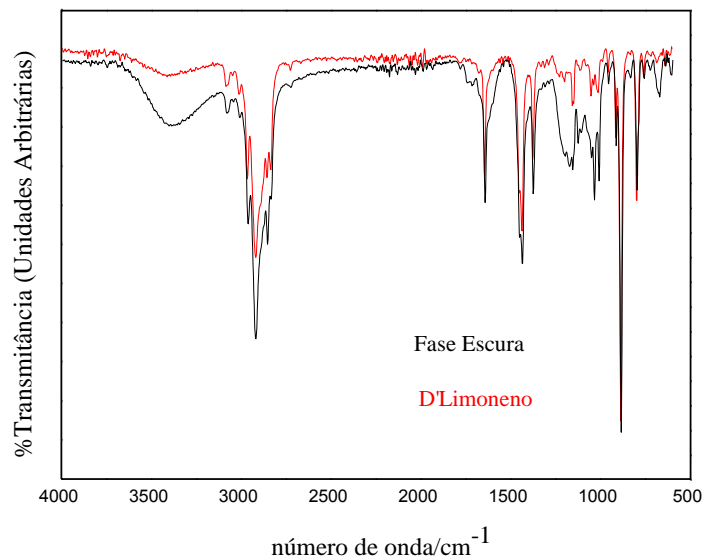
Figura 18: Espectro de infravermelho padrão para a fase escura e o poliestireno padrão



Fonte: Do Autor, 2021

A Figura 19 apresenta o espectro de infravermelho (transmitância em função do comprimento de onda) para o d-limoneno padrão e a fase escura, resultantes do processo de dissolução. Podemos observar uma enorme semelhança entre as fases, o que nos indica que realmente temos o d-limoneno presente após o processo de dissolução na fase escura. Esta fase poderá ser reutilizada em outros processos de dissolução, diminuindo o custo do processo. Esta reutilização será objeto de estudo deste trabalho.

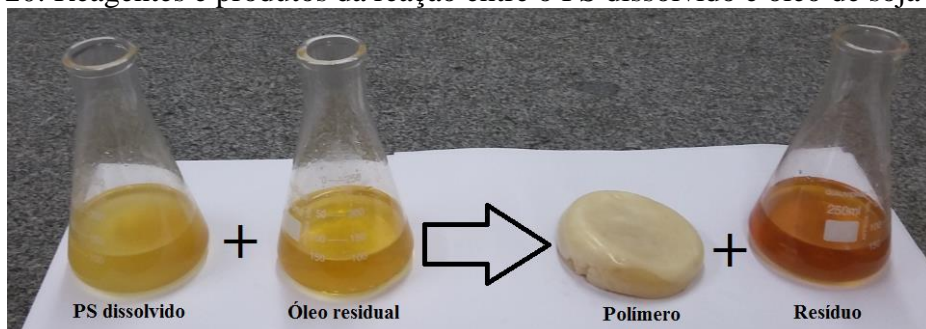
Figura 19: Espectro de infravermelho padrão para a fase escura e o d-limoneno padrão



Fonte: Do Autor, 2021

A Figura 20 apresenta os reagentes e produtos formados na reação de polimerização do estireno dissolvido (PS) e o óleo de soja residual. Observou-se que após a adição de óleo de soja (na proporção de 50% em volume), com uma leve agitação, há o aparecimento de um sólido branco, produto da polimerização do PS dissolvido. A reação resulta também em um líquido ao qual chamaremos de resíduo.

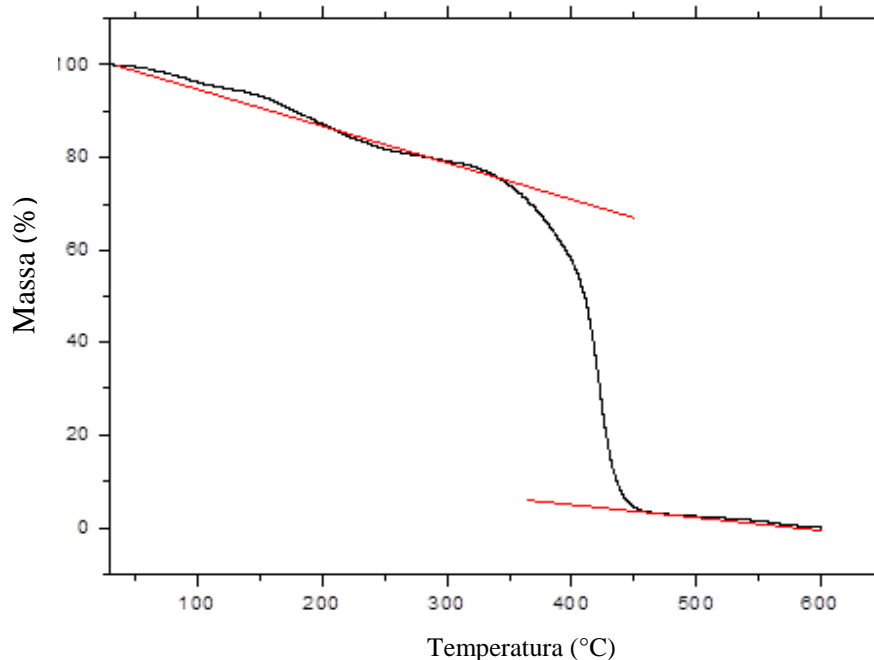
Figura 20: Reagentes e produtos da reação entre o PS dissolvido e óleo de soja residual



Fonte: Pamela, 2018

Podemos dizer que o sólido oriundo da mistura é predominantemente poliestireno que solubilizou na presença de óleo de soja residual. Isto dá ao processo de dissolução uma nova vertente e adiciona valor ao processo de reciclagem do EPS. Este processo também se torna interessante devido ao fato de se utilizar outro resíduo, o óleo de fritura, que é extensivamente produzido e descartado ao meio ambiente. De fato, todos os dias são descartados indevidamente óleos comestíveis residuais de residências, indústrias e estabelecimentos comerciais, que tem como destino os sistemas de esgoto, causando transtornos na rede de saneamento e poluição dos recursos hídricos (ALVES et al., 2017). Geralmente, o óleo de cozinha usado não é considerado um resíduo perigoso, mas pode causar problemas ambientais.

Figura 21: Análise termogravimétrica do EPS recuperado



Fonte: Do Autor, 2021

Para uma caracterização prévia do polímero obtido, foi realizada a análise térmica gravimétrica. A Figura 21 apresenta esse resultado. Podemos observar que o composto começa a se decompor próximo a 350°C e tem sua completa decomposição à aproximadamente 450°C. Este resultado é similar ao encontrado na literatura para o composto poliestireno (JANG et al., 2005). Assim, podemos dizer que este procedimento é viável para a reciclagem e recuperação do PS, no entanto, outros experimentos necessitam de serem realizados para atestar a qualidade do polímero recuperado.

A reciclagem destes produtos vem ganhando espaço cada vez maior, não simplesmente porque os resíduos representam "matérias primas" de baixo custo, mas, principalmente, porque

os efeitos da degradação ambiental decorrente de atividades industriais e urbanas estão atingindo níveis cada vez mais alarmantes. No entanto, o óleo residual de frituras pode ser reutilizado como matéria-prima na fabricação de diversos produtos, tais como biodiesel, sabão e detergentes, biossurfactantes, entre outros (ALVES et al., 2017). Assim, a metodologia proposta aqui dá uma nova vertente à utilização de óleos residuais e claro agrega valor ao processo de reciclagem do EPS.

Quanto à aplicabilidade do polímero recuperado, podemos dizer que está é vasta. Já está em andamento, em nosso grupo, o estudo da utilização deste polímero recuperado na fabricação de placas de aglomerado de madeira. Esse tipo de madeira é muito resistente e pode ser encontrado em diversos móveis e utilizações variadas.

6 CONCLUSÃO

O presente estudo realizou uma revisão sistemática sobre os métodos de reciclagem de EPS e apresentou uma nova metodologia para o reaproveitamento do EPS utilizando processos de dissolução deste material, por d-limoneno, e sua subsequente recuperação na presença de óleo de fritura residual. Visto que, comumente é empregada a reciclagem mecânica, causando a degradação molecular do isopor, devido a oxidação e a contaminação por outros materiais, o que resulta em um material reciclado de baixa qualidade. Com base nos dados obtidos por meio da revisão sistemática, os estudos mostraram satisfatórios. Os métodos de reciclagem de EPS encontrados são considerados atrativos, como por exemplo, na remoção de poluentes de águas residuais e a utilização de resíduos de EPS na construção civil.

A reciclagem do EPS por dissolução deste material, a partir do d-limoneno proporciona vantagens a técnica tradicional de reciclagem mecânica, pois permite uma significativa redução no volume, trata-se de uma técnica mais simples de ser empregada, possibilita a retirada de resíduos indesejáveis quando necessário e o produto final possui qualidade superior. Outra vantagem está relacionada a possibilidade da utilização do produto final para outros fins, inclusive para produção do EPS, sem adição de matéria-prima virgem, além da reutilização do solvente d-limoneno em novas rotas de reciclagem e do óleo de soja residual. Desta forma, a reciclagem por dissolução se apresentou bastante satisfatória no aspecto sustentável.

Por fim, acredita-se que a pesquisa corroborou como uma alternativa eficiente para o EPS que seria descartado, uma vez que, a disposição final deste resíduo representa um problema de difícil solução, em todo mundo, inclusive no Brasil, pelo volume que ocupa nos aterros sanitários.

7 REFERÊNCIAS

ABRAPEX. **O que é EPS**. Disponível em: <http://www.abrapex.com.br/01OqueeEPS.html>. Acesso em: 24 abr. 2018.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2019**. São Paulo, 2019.

ADRIAN, C. C. A. et al. Thermal Characterization of Microwave Assisted Foaming of Expandable Polystyrene. **Ingeniería Investigación y Tecnología**, v.17, n.1, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.01.002>. Acesso em: 10 mar. 2020.

AL-SALEM, S.M. Influential parameters on natural weathering under harsh climatic conditions of mechanically recycled plastic film specimens, **Journal of Environmental Management**, v.230, p.355-365, 2019.

ALVES, E. P. et al. Production and characterization of biosurfactants metabolized by *Pleurotus sajor-caju* from soybean oil. **Matéria (Rio J.)**. Rio de Janeiro, v.22, 2017.

AMBIENTE BRASIL. **Isopor (Poliestireno Expandido - EPS)**. Disponível em: http://ambientes.ambientebrasil.com.br/residuos/isopor/isopor_%28poliestireno_expandido_-_eps%29.html. Acesso em: 23 abr. 2020.

AMINUDIN, E. et al. A Review on Recycled Expanded Polystyrene Waste as Potential Thermal Reduction in Building Materials. **International Conference on Environment and Industrial Innovation**, v.12, 2011.

ANBUMANI, S., KAKKAR, P. Ecotoxicological effects of microplastics on biota: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v.25, p.14373-14396, 2018.

ANDRADE, B. T. N. C., BEZERRA, A. C. S., CALADO, C. R. Adding value to polystyrene waste by chemically transforming it into sulfonated polystyrene. **Matéria (Rio J.)**, Rio de Janeiro, v.24, n.3, 2019.

ANTICO, F. C. et al. Eco-bricks: a sustainable substitute for construction materials. **Revista de la Construcción**, Santiago, v.16, p.518-526, 2017.

BARCELLOS, G. S.; SCHWADE, P. V.; DA SILVA, S. A. Tinta à base de poliestireno expandido. **Revista Liberato**. Novo Hamburgo, v.14, p.113-238, 2013.

BARRERA, C. G.; OCAMPO. C. L.; OLAYA. F. J. Production and Characterization of the Mechanical and Thermal Properties of Expanded Polystyrene with Recycled Material, **Ingeniería y Universidad**. Bogotá, v.21, p.177-194, 2017.

BETANCOURT-S., D. J.; SOLANO-M., J. K. Síntesis y caracterización de la mezcla polipropileno-poliestireno expandido (icopor) reciclado como alternativa para el proceso de producción de autopartes. **Revista Luna Azul**, v.43, p.286-310, 2016.

BHADRA, J.; AL-THANI, N.; ABDULKAREEM, A. Micro and Nano Fibrillar Composites (MFCs and NFCs) from Polymer Blends Recycling of polymer-polymer composites. **Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering**, 2017.

BHUTTA, M. A. R.; OHAMA, Y.; TSURUTA, K. Strength properties of polymer mortar panels using methyl methacrylate solution of waste expanded polystyrene as binder. **Construction and Building Materials**, v.25, 2011.

BRASIL. Lei Federal nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 23 abr. 2020.

BUSINESS RESEARCH METHODOLOGY. **Types of Literature Review**. 2020. Disponível em: <https://research-methodology.net/research-methodology/types-literature-review/>. Acesso em: 30 set. 2020.

CAMARGO, F.P. et al. Limonene quantification by gas chromatography with mass spectrometry (GC-MS) and its effects on hydrogen and volatile fatty acids production in anaerobic reactors. **Química Nova**, v.43, n.7, p.844-850, 2020.

CAMPELO, N. M.; MACHADO, F. Reciclagem de poli(estireno-divinilbenzeno) via processo de polimerização em massa-suspensão. **Polímeros**, São Carlos, v.23, p.212-222, 2013.

CARBONAI, D.; BAUM, J.; CAMIZ, S. Gestão municipal de resíduos e ambiente institucional no Rio Grande do Sul. **EURE (Santiago)**, v.46, n.138, p.139-153, 2020.

CARVALHO, C. H. R.; MOTTA, L. A. C. Study about concrete with recycled expanded polystyrene. **Ibracon Structures and Materials Journal**, v.12, n.6, p.1390-1407, 2019.

CELLA, R. F. **Reciclagem de Espumas Semi-Rígidas de Poliestireno pela Dissolução em Terpenos e Secagem em Secador de Tambor**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Florianópolis, SC, 2012.

CITRUSBR – **Associação Nacional dos Exportadores de Sucos Cítricos**. Produção de Laranja e Suco. Disponível em: Acesso em: 02 jun. 2012.

COSTA NETO, P. R.; ROSSI, L. F. S.; ZAGONEL, G. F.; RAMOS, L. P. Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras. **Química Nova**, v.23, n.4, p.531-537, 2000.

DÍAZ-MENDOZA, C., et al. Plastics and microplastics, effects on marine coastal areas: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v.27, p.39913-39922, 2020.

EPA, 2020. **Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos: Containers and packaging product specific data**. Disponível em: <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/containers-and-packaging-product-specific-data>. Acesso em: 27 nov. 2020.

- FIDELIS, R. et al. Socio-productive inclusion of scavengers in municipal solid waste management in Brazil: Practices, paradigms and future prospects. **Resources, Conservation and Recycling**, v.154, 2020.
- FILHO, T. S. et al. Passive bioremediation: a preliminary study on waste vegetable oil. **Ciência e Natura**, v.37, p.401-404, 2015.
- GALLOWAY, TS. COLE, M., LEWIS, C. Interactions of microplastic debris across the marine ecosystem. **Nature Ecology e Evolution**, v.1, 2017. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41559-017-0116>. Acesso em 27 nov. 2020.
- GARCIA, M. J. ROBERTSON, M.L. The future of plastics recycling. **Science**, v.358, p.870-872, 2017.
- GARCÍA, M. T. et al. Recycling extruded polystyrene by dissolution with suitable solvents. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v.11, p.2-5. 2009.
- GEYER, R. JAMBECK, J. R. LAW, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made **Science Advances**, v.3, 2017.
- GIL-JASSO, N. et al. Dissolution and recovery of waste expanded polystyrene using alternative essential oils. **Fuel**, v.239, p.611-616, 2019.
- GRANT, M. J.; BOOTH, A. A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies. **Health Information & Libraries Journal**, v.26, n.2, p.91-108, 2009.
- GRIFFITH UNIVERSITY. **Systematic Literature Reviews for Education**. 2020. Disponível em: <https://libraryguides.griffith.edu.au/c.php?g=451351&p=3333115>. Acesso em: 10 jul. 2020.
- GUTIERREZ, C. et al. Reduction of the carbon footprint through polystyrene recycling: Economical evaluation. **Process Safety and Environmental Protection**, v.101, p.144-151, 2016.
- GUTIERREZ-ESTUPINAN, C.; GUTIERREZ-GALLEGO, J.; SANCHEZ-SOLEDAD, M. Preparation of a Composite Material from Palm Oil Fiber and an Ecological Emulsion of Expanded Polystyrene Post-Consumption. **Revista Facultad de Ingeniería**, v.29, n.54, 2020.
- HATTORI, K. et al. Dissolution of polystyrene into p-cymene and related substances in tree leaf oils. **Journal of Wood Science**. v.56, p.169-171, 2010.
- HATTORI, K. et al. Solubilization of Polystyrene into Monoterpenes. **Advances in Polymer Technology**, v.27, n.1, p.35-39, 2008.
- HATTORI, K. Recycling of Expanded Polystyrene Using Natural Solvents. **IntechOpen**, 2015. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/recycling-materials-based-on-environmentally-friendly-techniques/recycling-of-expanded-polystyrene-using-natural-solvents>. Acesso em: 12 set. 2020

HEARON, K. et al. A High-Performance Recycling Solution for Polystyrene Achieved by the Synthesis of Renewable Poly (thioether) Networks Derived from d-Limonene. **Advanced Materials**, v.26, p.1552-1558, 2014.

HERKI, B.A.; KHATIB, J.M. Valorisation of waste expanded polystyrene in concrete using a novel recycling technique. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 21, n.11, p.1384-1402, 2017.

HERNANDEZ, C. S.; DIAZ JIMENEZ, M. L. V. Evaluación de un proceso industrial de producción de biodiésel mediante análisis de ciclo de vida. **Revista Internacional Contaminación Ambiental**, México, v.34, p.453-465, 2018.

HICKS, A.; MARTEN, B. Expanded Polystyrene Life Cycle Analysis Literature Review: An Analysis for Different Disposal Scenarios **Sustainability: The Journal of Record**, v. 11, n. 1, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1089/sus.2017.0015>. Acesso em: 20 mai. 2020.

HU, A. et al. A green and low-cost strategy to synthesis of tunable pore sizes porous organic polymers derived from waste-expanded polystyrene for highly efficient removal of organic contaminants. **Chemical Engineering Journal**, v.370, p. 251-261, 2019.

JANG, B. N.; WILKIE, C. A. The thermal degradation of polystyrene nanocomposite. **Polymer**, v.46, n.9, p. 2933-2942, 2005.

JANG, M. et al. Formation of microplastics by polychaetes (*Marphysa sanguinea*) inhabiting expanded polystyrene marine debris. **Marine Pollution Bulletin**, v.131, p.365-369, 2018.

JIMENEZ-FRANCISCO, M. et al. Performance Assessment of a Composite Material Based on Kraft Paper and a Resin Formulated with Expanded Polystyrene Waste: A Case Study from Mexico. **Journal Polymer Environment**, v.36, p.1573-1580, 2018.

KAMPOURIS, E. M.; PAPASPYRIDES, C. D.; LEKAKOU, C. N. A model recovery process for scrap polystyrene foam by means of solvent systems. **Conservation & Recycling**, v.10, n.4, p.315-319, 1987.

KERBER, J. C. et al. Preliminary study for implementation of voluntary delivery points of expanded polystyrene: a case in southern Brazil. **Production**, São Paulo, v.30, 2020.

LEO-CONDES, C. A. et al. Sulfonated and gamma-irradiated waste expanded polystyrene with iron oxide nanoparticles, for removal of indigo carmine dye in textile wastewater. **Heliyon**, v.5, 2019.

LIU, D.; LIU, J. Converting waste expanded polystyrene into polymeric azo dyes containing the sulfonamide group. **Journal Mater Cycles Waste Management**, v.16, p.557-565, 2014.

MACHADO, Paulo A. L. **Direito Ambiental Brasileiro**, 20. ed. São Paulo: Malheiros Editores, p.22, 2012.

MAHARANA, T.; Negi, Y. S.; Mohanty, B. Review Article: Recycling of Polystyrene. **Polymer-Plastics Technology and Engineering**, v.46, n.7, p.729-736, 2007.

MUMBACK, D. G. et al, Dissolution of adhesive resins present in plastic waste to recover polyolefin by sink-float separation processes. **Journal of Environmental Management**, v. 243, p.453-462, 2019.

MASRI, T. et al. Characterization of new composite material based on date palm leaflets and expanded polystyrene wastes. **Construction and Building Materials**, v.164, p.410-418, 2018.

MONASH UNIVERSITY, **Introduction to literature reviews**. Disponível em: <https://www.monash.edu/rlo/graduate-research-writing/write-the-thesis/introduction-literature-reviews>. Acesso em: 30 set. 2020.

NASCIMENTO, L. L. Avaliação comparativa entre a política nacional de resíduos sólidos e a política municipal de resíduos da cidade de Campos dos Goytacazes. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, v.11, p.19-30, 2017.

NOGUCHI, T.; MIYASHITA, M.; WATANABE H. Mechanical Properties of Polystyrene Recycled Using d-Limonene. **Center for Environmental Technology, Sony Corporation Frontier Science Laboratories**. Japan, 2011.

PAVLU, T. et al. The Utilization of Recycled Masonry Aggregate and Recycled EPS for Concrete Blocks for Mortarless Masonry. **Materials**, v.12, 2019.

PEREIRA, T. S.; FERNANDINO, G. Evaluation of solid waste management sustainability of a coastal municipality from northeastern Brazil. **Ocean & Coastal Management**, v.1791, 2019.

PETRELLA, A.; MUNDO, D.R.; NOARNICOLA, M. Recycled Expanded Polystyrene as Lightweight Aggregate for Environmentally Sustainable Cement Conglomerates. **Materials**, v.13, 2020.

PLASTICS EUROPE. **Association of Plastics Manufacturers: An analysis of European plastics production, demand and waste data**. 2019. Disponível em: https://www.plasticseurope.org/application/files/9715/7129/9584/FINAL_web_version_Plastics_the_facts2019_14102019.pdf. Acesso em: 27 nov. 2020.

POLETTI, M. Characterization of composites based on expanded polystyrene wastes and wood flour. **Waste Management**, v.31, p.779-784, 2011.

RITCHIE, H.; ROSER, M. Plastic Pollution. **Our World In Dat**, 2018. Disponível em: <https://ourworldindata.org/plastic-pollution#plastic-trade-impact-of-china-s-import-ban>. Acesso em: 27 nov. 2020.

SARMIENTO, A et al. Expanded Polystyrene (EPS) and Waste Cooking Oil (WCO): From Urban Wastes to Potential Material of Construction. **Waste and Biomass Valorization**, v.7, p.1245-1254, 2016.

SEKHARAN, R. J.; ABRAHAM, B.T.; THACHIL, E.T. Utilization of waste expanded polystyrene: Blends with silica-filled natural rubber. **Materials and Design**, v.40, p.221-228, 2012.

SEOW, T.W.; ABAS, A. M. A Review of the Public Policy for Solid Waste Management in Malaysia: An Insight towards Sustainable Solid Waste Management. **Australian Journal of basic and applied sciences**, v.10, p.58-64, 2016.

SINDIPLAST- Sindicato da Indústria de Material Plástico do Estado de São Paulo. **Guia ambiental da indústria de transformação e reciclagem de materiais plásticos**. São Paulo, 2011.

SINGH, N. et al. Recycling of plastic solid waste: a state of art review and future applications. **Composites Part B: Engineering**, v.115, p.409-422, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.013>. Acesso em: 5 mar. 2020.

SIYAL, A. N. et al. Chemical Recycling of Expanded Polystyrene Waste: Synthesis of Novel Functional Polystyrene-Hydrazone Surface for Phenol Removal. **Hindawi Publishing Corporation**, v.2013, 2013.

SONY. **Orange R-net**: Sony High-quality Foamed Polystyrene Recycling System. Tokyo, Japan, 2003.

SPINACE, M. A. S.; DE PAOLI, M. A. A tecnologia da reciclagem de polímeros. **Química Nova**, São Paulo, v.28, n.1, p.65-72, 2005.

SUŁKOWSKI, W.W. et al. The Conditions of Cationic Exchange with the Use of Recycling Polystyrene Derivative, the Product of Sulfonation by Silica Sulfuric Acid. **Applied Polymer Science**, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.10.027>. Acesso em: 04 set. 2020.

TAIATELE JUNIOR, I. et al. Biodegradability assessment of starch/glycerol foam and poly(butylene adipate-co-terephthalate)/starch film by respirometric tests. **Brazilian Journal of Food Technology**, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1981-6723.24818>. Acesso em: 04 set. 2020.

TAWFIK, M. E.; ESKANDER, S. B.; NAWWAR, G. AM. Hard wood-composites made of rice straw and recycled polystyrene foam wastes. **Applied Polymer**, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/app.44770>. Acesso em: 01 dez 2019.

UNIVERSITY OF NORTH CAROLINA. The Writing Center. **Literature Reviews**. 2020. Disponível em: <https://writingcenter.unc.edu/tips-and-tools/literature-reviews/>. Acesso em: 29 set. 2020.

UNIVERSITY OF SOUTH CAROLINA. Upstate. **Literature Review**: Purpose of a Literature Review. 2020. Disponível em: <https://uscupstate.libguides.com/c.php?g=627058&p=4389968#:~:text=The%20purpose%20of%20a%20literature,questions%20left%20from%20other%20research>. Acesso em: 29 set. 2020.

UNIVERSITY LIBRARY. **Literature Review - A Self-Guided Tutorial**. Disponível em: <http://www.ulib.iupui.edu/guides/literature-review-self-guided-tutorial>. Acesso em: 30 set. 2020.

VELOSO, Y. M. S. et al. Rotas para reutilização de óleos residuais de fritura. **Cadernos de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas**, Sergipe v.1, n.15, p.11-18, 2012.

VILAS BOAS DA SILVA, L. J. et al. Incineration of solid urban waste in Brazil: an analysis of the economically viable energy potential. **Renewable Energy**, v.149, p.1386-1394, 2020.

WASTERN LIBRARIES. **Literature Reviews, Introduction to Different Types.**

Disponível em: <https://www.lib.uwo.ca/tutorials/typesofliteraturereviews/index.html>. Acesso em: 30 set. 2020.

YADAV, S. SHARMA, C. Novel and green processes for citrus peel extract: a natural solvent to source of carbon. **Polymer Bulletin**, v.75, p.5133-5142, 2018.

YANG, J. et al. Preparation of recycled graphite/expanded polystyrene by a facile solvent dissolution method. **Journal of Materials Science**, v.54, p.1197-1204, 2019.

WERNCKE SILVA, A. N. B. et al. Reuse of expanded Polystyrene for waterproofing production and Application in Civil Construction. International. **Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v.7, p.348-351, 2020.

ZHANG, Y. et al. Porous carbon derived from waste polystyrene foam for supercapacitor. **Journal of Materials Science**, v.53, n.17, p.12115-12122, 2018.

ZHAO, Y.; LV, X. D.; NI, H. G. Solvent-based separation and recycling of waste plastics: a review. **Chemosphere**, v.209, p.707-720, 2018.

APÊNDICE A – Artigos incluídos na revisão sistemática

N°	Título	Autor (s)	Revista	Ano
I	Preparation of recycled graphite/expanded polystyrene by a facile solvent dissolution method	Yang, J. et al	Journal of Materials Science	2020
II	Reuse of expanded Polystyrene for waterproofing production and Application in Civil Construction	Werncke Silva, A. N. B et al	International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)	2020
III	Recycled Expanded Polystyrene as Lightweight Aggregate for Environmentally Sustainable Cement Conglomerates	Petrella; Di Mundo; Notarnicola	Materials	2020
IV	Preparation of a Composite Material from Palm Oil Fiber and an Ecological Emulsion of Expanded Polystyrene Post-Consumption	Gutiérrez-Estupiñán; Gutiérrez-Gallego; Sánchez-Soledad	Facultad de Ingeniería	2020
V	Dissolution and recovery of waste expanded polystyrene using alternative essential oils.	Gil-Jasso, N. et al	Fuel	2019
VI	Dissolution of adhesive resins present in plastic waste to recover polyolefin by sink-float separation process	Mumbach, D.G. et al	Journal of Environmental	2019
VII	Study about concrete with recycled expanded polystyrene	Carvalho, C. H. R.; Motta, L. A. C	Ibracon Structures and Materials Journal	2019
VIII	Sulfonated and gamma-irradiated waste expanded polystyrene with iron oxide nanoparticles, for removal of indigo carmine dye in textile wastewater	Leon-Condes, C. A et al	Heliyon	2019
IX	A green and low-cost strategy to synthesis of tunable pore sizes porous organic polymers derived from waste-expanded polystyrene for highly efficient removal of organic contaminants	Hu, A et al	Chemical Engineering Journal	2019
X	The Utilization of Recycled Masonry Aggregate and Recycled EPS for Concrete Blocks for Mortarless Masonry	Pavlu, T. et al	Materials	2019
XI	From polystyrene waste to porous carbon flake and potential application in supercapacitor	Jiakang, M. et al	Waste Management	2019

N°	Título	Autor (s)	Revista	Ano
XII	Integrated Polymer Dissolution and Solution Blow Spinning Coupled with Solvent Recovery for Expanded Polystyrene Recycling	Singhal, Ishita e Sow	Journal of Polymers and the Environment	2019
XIII	Performance Assessment of a Composite Material Based on Kraft Paper and a Resin Formulated with Expanded Polystyrene Waste: A Case Study from Mexico.	Jimenez-Francisco, M. et al	Journal of Polymers and the Environment	2018
XIV	Novel and green processes for citrus peel extract: a natural solvent to source of carbon	Yadav, S. Sharma, C	Polymer Bulletin	2018
XV	Characterization of new composite material based on date palm leaflets and expanded polystyrene wastes	Masri, T. et al	Construction and Building Materials	2018
XVI	Performance and emissions of a diesel engine fueled by biodieseldiesel blends with recycled expanded polystyrene and fuel stabilizing additive	Calder; Roy; Wang	Energy	2017
XVII	Hard wood-composites made of rice straw and recycled polystyrene foam wastes	Tawfik; Eskander, Nawwar	Applied Polymer Science	2016
XVIII	Expanded Polystyrene (EPS) and Waste Cooking Oil (WCO): From Urban Wastes to Potential Material of Construction	Sarmiento, A. et al	Waste and Biomass Valorization	2016
XIX	Valorisation of waste expanded polystyrene in concrete using a novel recycling technique	Herki B.A, Khatib. J.M	European Journal of Environmental and Civil Engineering	2016
XX	Reduction of the carbon footprint through polystyrene recycling: Economical evaluation	Gutiérrez, C	Process Safety and Environmental Protection	2015
XXI	Recycling of Expanded Polystyrene Using Natural Solvents	Hattori, K	IntechOpen	2014

N°	Título	Autor (s)	Revista	Ano
XXII	A High-Performance Recycling Solution for Polystyrene Achieved by the Synthesis of Renewable Poly (thioether) Networks Derived from d-Limonene.	Hearon, K. et al	Advanced Materials	2014
XXIII	Converting waste expanded polystyrene into polymeric azo dyes containing the sulfonamide group	Liu e Liu	Journal Mater Cycles Waste Manag	2013
XXIV	Chemical Recycling of Expanded Polystyrene Waste: Synthesis of Novel Functional Polystyrene-Hydrazone Surface for Phenol Removal	Siyal, A. N et al	Hindawi Publishing Corporation	2012
XXV	Utilization of waste expanded polystyrene: Blends with silica-filled natural rubber	Sekharan; Abraham e Thachil	Materials and Design	2011
XXVI	A Review on Recycled Expanded Polystyrene Waste as Potential Thermal Reduction in Building Materials	Aminudin, E. et al	International Conference on Environment and Industrial Innovation	2011
XXVII	Characterization of composites based on expanded polystyrene wastes and wood flour	Poletto, M. et al	Waste Management	2011
XXVIII	The Conditions of Cationic Exchange with the Use of Recycling Polystyrene Derivative, the Product of Sulfonation by Silica Sulfuric Acid	Sułkowski, W.W. et al	Applied Polymer Science	2009
XIXX	Recycling extruded polystyrene by dissolution with suitable solvents	García, M.T. et al	Journal Mater Cycles Waste Manag	2008
XXX	Solubilization of Polystyrene into Monoterpenes	Hattori, K. et al	Advances in Polymer Technology	2007
XXXI	Review Article: Recycling of Polystyrene	Maharana, Negi e Mohanty	Polymer-Plastics Technology and Engineering	2007