

Sustentabilidade no uso de poliuretano e reutilizações de aparas

Sustainability in the use of polyurethane and reuse of shavings

Sostenibilidad en el uso de poliuretano y reutilización de virutas

Recebido: 28/11/2020 | Revisado: 03/12/2020 | Aceito: 07/12/2020 | Publicado: 10/12/2020

André Carlos Grotto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2164-7084>

Universidade de Passo Fundo, Brasil

E-mail: 145084@upf.br

Marcelo Hemkemeier

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6541-4827>

Universidade de Passo Fundo, Brasil

E-mail: marceloh@upf.br

Maiara Vizioli Rossato

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3101-511X>

Universidade de Passo Fundo, Brasil

E-mail: 167960@upf.br

Resumo

O poliuretano é um dos maiores produtos poliméricos da família do plástico. É um material produzido por reação de condensação entre polióis e isocianatos e pode ser utilizado em uma vasta gama de aplicações, o que desencadeou um crescimento acentuado na sua utilização nos últimos anos. É considerado um produto altamente promissor e versátil devido à sua morfologia atraente e ampla gama de propriedades mecânicas desejáveis. O grande uso comercial leva a geração de resíduos (aparas), e se não reutilizados ou descartados corretamente, esse produto causa impactos ambientais. Desta forma, deseja-se avaliar a sustentabilidade em relação ao uso desse produto e as possíveis reutilizações das aparas. Constatou-se que as principais alternativas de descarte das aparas são em aterros sanitários, incineração, reciclagem e recuperação. A opção mais sustentável seria a reutilização das aparas para geração de outros produtos. Identificou-se processos que a partir dos resíduos criaram novos produtos e são vantajosos pelo fato de reaproveitar rejeitos que não possuíam destino correto e por gerar fonte de renda.

Palavras-chave: Produtos poliméricos; Impactos ambientais; Reutilização de resíduos; Reciclagem.

Abstract

Polyurethane is one of the largest polymeric products in the plastic family. It is a material produced by a condensation reaction between polyols and isocyanates and can be used in a wide range of applications, which has triggered a marked growth in its use in recent years. It is considered a highly promising and versatile product due to its attractive morphology and wide range of desirable mechanical properties. The great commercial use leads to the generation of waste (shavings), and if not reused or disposed of correctly, this product causes environmental impacts. In this way, we want to evaluate the sustainability in relation to the use of this product and the possible reuse of the shavings. It was found that the main alternatives for shavings disposal are in landfills, incineration, recycling and recovery. The most sustainable option would be the reuse of shavings for the generation of other products. Processes were identified that created new products from waste and are advantageous because they reuse waste that did not owned a correct destination and for generating a source of income.

Keywords: Polymeric products; Environmental impacts; Waste reuse; Recycling.

Resumen

El poliuretano es uno de los productos poliméricos más grandes de la familia de los plásticos. Es un material producido por una reacción de condensación entre polioles e isocianatos y se puede utilizar en una amplia gama de aplicaciones, lo que ha provocado un marcado crecimiento en su uso en los últimos años. Se considera un producto muy prometedor y versátil debido a su atractiva morfología y su amplia gama de deseables propiedades mecánicas. El gran uso comercial conduce a la generación de residuos (virutas), y si no se reutiliza o elimina correctamente, este producto provoca impactos ambientales. De esta forma, queremos evaluar la sostenibilidad en relación al uso de este producto y la posible reutilización de los virutas. Se encontró que las principales alternativas para la eliminación de la virutas son los vertederos, la incineración, el reciclaje y la recuperación. La opción más sostenible sería la reutilización de chips para la generación de otros productos. Se identificaron procesos que generaron nuevos productos a partir de residuos y son ventajosos porque reutilizan residuos que no tuvieron un destino correcto y para generar una fuente de ingresos.

Palabras clave: Productos poliméricos; Impactos ambientales; Reutilización de residuos; Reciclaje.

1. Introdução

A questão da sustentabilidade no âmbito científico é baseada em três pilares: desenvolvimento econômico, social e proteção ambiental. Para que ocorra um desenvolvimento sustentável é preciso que as necessidades presentes sejam satisfeitas sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades (Barcelos et al., 2020).

O poliuretano é um dos maiores produtos poliméricos da família do plástico e como consequência direta ao seu grande uso comercial, uma quantidade elevada de resíduos precisa ser tratada, e assim, na última década, uma porcentagem crescente desses resíduos acabou sendo descartada em aterros. As aparas compreendem não apenas produtos pós-consumo, mas também resíduos da fabricação de placas, que podem chegar a 10% da produção total de espuma (Simón, Borreguero, Lucas, & Rodríguez, 2018; Somarathna, Raman, Mohotti, Mutalib, & Badri, 2018).

Quando consegue-se converter o resíduo em produto semelhante ao inicial é possível economizar energia, poupar recursos naturais e trazer de volta ao ciclo produtivo o que é descartado. Já quando os resíduos não podem ser evitados, estes deverão ser recuperados, reutilizados ou reciclados, de modo que o mínimo possível tenha como destino final os aterros industriais, aterros sanitários ou ainda o meio ambiente, já que o produto apresenta decomposição lenta, é um sólido combustível e apresenta vida útil longa (Barcelos et al., 2020).

A reciclagem de materiais tornou-se um campo de pesquisa, desenvolvimento e aplicação de recursos, uma vez que existe um interesse ambiental e econômico na retirada de materiais descartados do meio ambiente. Desta forma, a busca por rotas viáveis para o aproveitamento de materiais descartados vem sendo estudada visando encontrar mercado para seu emprego (Barcelos et al., 2020).

Desta forma, é possível evidenciar que junto com o grande crescimento da utilização de poliuretano surge o problema relacionado aos resíduos desse produto, pois quando maior for a utilização, maior será a quantidade de aparas. Se não tratadas de forma adequada, essas aparas ocasionam danos ambientais. Porém se tratadas adequadamente, poderão ser reaproveitados e trarão benefícios para o ambiente e para a economia. Este é um assunto

relevante pelo fato do aumento gradual no uso desse material, em função do aumento das indústrias consumidoras que possibilitaram uma maior penetração de mercado do produto. Isso está ligado a grande diversidade de usos que o poliuretano possibilitou para o mercado e nas diversas formas em que o mesmo é encontrado. Pensando nisso, o presente artigo abordou um estudo sobre poliuretano, com o objetivo de avaliar sua utilização, impactos ambientais, formas de reciclagem e alternativas para o reuso que estão sendo aplicadas.

2. Obtenção e Uso do Poliuretano

O poliuretano é um material polimérico produzido por reação de condensação entre dióis ou polióis e diisocianatos ou poliisocianatos. Em termos básicos, os polímeros podem ser descritos como moléculas extremamente longas que geralmente são compostas por vários milhares de unidades repetidas (Tantisattayakul, Kanchanapiya, & Methacanon, 2018; Somarathna et al., 2018). Além disso, levando-se em consideração a especialidade de poliuretano a ser produzido, o processo de fabricação pode compreender mais reações, como a formação de gás na síntese das espumas de poliuretano (Simón et al., 2018).

Ao contrário da maioria dos outros plásticos comumente usados, a família dos poliuretanos não é polímero de polimerização, mas sim polímero de condensação, sintetizados a partir de polióis e isocianatos. Devido à grande diversidade de polióis e isocianatos, é possível gerar vários compostos diferentes e assim gerar uma vasta gama de aplicações (Simón et al., 2018). Também é considerado um material altamente promissor e versátil devido à sua morfologia atraente e ampla gama de propriedades mecânicas desejáveis, possibilitadas pela capacidade de alterar sua microestrutura para atender a diversas aplicações (Somarathna et al., 2018).

O poliuretano é um material de isolamento e é classificado como resíduo sólido não perigoso. Apresenta as características de estabilidade térmica, absorção de água e energia, ausência de produção de emissões perigosas para pessoas e ambiente, resistência química, resistência a compressão, capacidade de alongamento, reação ao fogo e alta durabilidade, o que não gera necessidade de manutenção. Além disso, são excelentes isolantes térmicos por possuírem uma baixa condutividade térmica (Somarathna et al., 2018; Guolo, Cappelletti, Romagnoni, & Raggiotto, 2019).

Sua gama de aplicações é bem ampla, onde destacam-se: tintas; isolamento rígido; isolamento para geladeiras freezers e edifícios; revestimento de proteção; almofadas, colchões ou assentos de automóveis; revestimentos; adesivos; selantes; construção civil; automotivo;

calçados; artigos esportivos como rodas de patins, esquis e pranchas de surf; embalagens; têxteis; vestuário (Cangemi, Santos, & Claro Neto, 2009; Tantisattayakul et al., 2018; Somarathna et al., 2018).

Já conforme descrito pela empresa Sulfibra, que aborda o uso de poliuretano em forma de placas rígidas, esse material é utilizado no isolamento térmico de refrigeradores, contêineres, frigoríficos, caminhões, vagões, tanques, aquecedores e demais produtos que necessitem de isolamento térmico. Também são utilizadas na fabricação de painéis divisórios, pisos e estruturas flutuantes a prova de furos para barcos, equipamentos de flutuação e componentes de carros, ônibus, trens e aviões (Sulfibra, 2020).

Atualmente o olhar volta-se para a etapa de fabricação e/ou obtenção do poliuretano e posteriormente ao uso do mesmo, onde as empresas produtoras trabalham com o objetivo de suprir a demanda de mercado. Como ele abrange uma vasta gama de aplicações, seu uso cresce de maneira acentuada. Dependendo da especialidade de poliuretano, os rejeitos decorrentes do processo de uso são elevados, como por exemplo, as placas de poliuretano utilizadas no isolamento térmico de baús frigoríficos. A Figura 1 demonstra o corte de placas de poliuretano em uma empresa fabricante de baús frigoríficos.

Figura 1 – Corte de placas de poliuretano.



Fonte: Autores (2020).

Nesse processo de fabricação ocorre muito corte das placas, o que, como pode ser visto na Figura 1, ocasiona geração de aparas que representam um problema. No entanto, esse problema não pode ser evitado, mas pode ser corrigido se os rejeitos possuírem um reuso ou descarte correto.

3. Tipos de Poliuretano

Dependendo do polioli e do isocianato empregados na reação e também da extensão das reações envolvidas, é possível obter uma grande variedade de tipos de poliuretanos, lineares ou reticulados. Além disso, nos atuais processos de fabricação de poliuretano, diferentes aditivos são usados com o objetivo de modificar as propriedades do produto final. Do ponto de vista da aplicação, os poliuretanos podem ser classificados principalmente em espumas rígidas, espumas flexíveis e nos denominados CASE (Simón et al., 2018).

3.1 Espumas flexíveis

Esse tipo de poliuretano representa cerca de 45% da produção total, o que significa cerca de 7,9 milhões de toneladas por ano. Eles podem ser separados em três grupos diferentes: espumas convencionais, as quais são produzidas em blocos; espumas viscoelásticas, as quais são empregadas em colchões e travesseiros, pois se ajustam para acomodar os vários pontos de pressão, como ombros e quadris; espumas de alta resiliência, utilizadas para almofadas, especialmente na indústria automotiva (Simón, Borreguero, Lucas, & Rodríguez, 2015)

Cerca de 90% das espumas flexíveis são sintetizadas a partir de polióis poliéter de cadeia longa à base de etileno e óxido de propileno. As espumas convencionais são produzidas usando apenas um poliéter polioli flexível ou uma mistura de um poliéter polioli flexível com um enxerto polimérico e diisocianato de tolueno como isocianato. Por outro lado, as espumas de alta resiliência são produzidas por polióis de poliéter de cadeia longa. Já as espumas viscoelásticas são produzidas por uma mistura de dois tipos de polióis: um poliéter polioli de alto peso molecular e um de cadeia curta. O principal objetivo do uso de uma mistura de polióis é quebrar a simetria da matriz de poliuretano para obter baixa resiliência. Portanto, a principal vantagem desse tipo de espuma é o desempenho na distribuição de pressão (Simón, Borreguero, Lucas, & Rodríguez, 2014, 2015).

3.2 Espumas rígidas

As espumas de poliuretano rígidas ou flexíveis são um dos polímeros fundamentais da indústria do plástico. Essas espumas são polímeros altamente reticulados com uma estrutura de célula essencialmente fechada e baixa condutividade térmica, o que faz dela um material

dominante para isolamento de edifícios e refrigeração comercial, construção, transporte, decoração, etc. As principais diferenças entre as espumas flexíveis e rígidas são o peso molecular do polioli usado e sua funcionalidade (Simón et al., 2015; Farhan, Wang, Jiang, & Li, 2016).

As espumas rígidas são sintetizadas usando polióis de cadeia curta, com pesos moleculares na faixa de 290 a 670 g/mol, embora alguns polióis possam atingir um peso molecular de 1050 g/mol em algumas espumas rígidas de um componente (Simón et al., 2015). A densidade da espuma rígida de poliuretano está na faixa entre 30 e 40 kg/m³. Essa densidade é determinada pelos produtos químicos usados em sua produção, consistindo em dois componentes principais: polióis formulados e isocianatos (Simón et al., 2018).

As placas de poliuretano rígido (PUR) possuem uma estrutura molecular uniforme e além de possuírem baixo coeficiente de condutibilidade térmica, o que conferem a elas excelente isolamento térmico, elas apresentam baixa friabilidade, baixo fator de absorção de água, alta capacidade estrutural, estabilidade dimensional, retardação ao fogo e alta rigidez (Sulfibra, 2020). Essas placas são utilizadas principalmente para a geração do isolamento térmico tanto de freezers, como de câmaras frigoríficas e baús frigoríficos.

Já o poliuretano expandido rígido é muito utilizado no isolamento térmico no setor de construção, pelo fato de se apresentar na forma líquida e ao gerar a mistura dos componentes ocorre uma reação e o produto transforma-se em uma espuma rígida. Guolo et al. (2019) destaca que entre os isolantes térmicos atualmente em uso, ele é um dos que mais permitem obter excelentes características de massas de baixíssima densidade. Isso apresenta a vantagem de redução do consumo de energia decorrente do transporte, instalação e eliminação ou reciclagem em fim de vida (Guolo et al., 2019).

3.3 CASEs

CASEs significa revestimentos, adesivos, selantes e elastômeros. Os revestimentos, aditivos e selantes são usados na construção, transporte e na indústria naval. Portanto, suas aplicações são baseadas em sua dureza, resistência à umidade e durabilidade. Por outro lado, os elastômeros são usados em calçados esportivos, pistas de atletismo e produtos eletrônicos (Simón et al., 2018).

Na síntese de CASEs, tanto polióis de cadeia longa ou média são usados, como também diferentes extensores de cadeia. Esses extensores de cadeia reagem com o isocianato produzindo os segmentos duros da estrutura, enquanto os segmentos moles são formados por

macrodióis com pesos moleculares entre 1000 e 2000 g/mol (Simón et al., 2018).

4. Impactos Ambientais

O poliuretano é obtido através da reação entre polióis e isocianatos e é classificado como resíduo não perigoso, apresentando ausência de produção de emissões perigosas para pessoas e ambiente. No entanto, todo e qualquer produto quando descartado de forma inadequada no ambiente gera impactos ambientais, e com o poliuretano não é diferente. Tantisattayakul et al. (2018), destaca que o descarte do poliuretano em aterros apresenta o menor impacto de mudança climática e esgotamento fósseis, porém requer muito espaço, devido à baixa densidade (30-40 kg/m³). Já a incineração causa impacto ambiental e forma substâncias altamente tóxicas (Tantisattayakul et al., 2018).

Uma ferramenta citada na literatura como forma de identificar e quantificar a energia, os materiais consumidos e os resíduos liberados como impacto ambiental durante os processos é a Avaliação do Ciclo de Vida. Ela trata-se de uma ferramenta que apoia as empresas na identificação de oportunidades de melhoria de produção e processo, para aprimorar estratégias de planejamento e comercialização de um produto com sistema de rotulagem ambiental. A empresa italiana Stiferite SpA, é produtora de painéis termoendurecíveis em poliuretano expandido rígido com células fechadas e foi a primeira empresa europeia a realizar essa Avaliação do Ciclo de Vida em seus produtos (Guolo et al., 2019)

Em termos de construção, é importante utilizar métodos de avaliação econômica e ambiental para fazer os investimentos certos. A Associazione Nazionale Poliuretano Espanso (ANPE) e empresas individuais de isolamento térmico de poliuretano desenvolveram inúmeros estudos sobre os impactos ambientais durante o ciclo de vida, destacando como a quantidade de recursos consumidos para a produção de poliuretano expandido é amortizada na fase de uso da edificação graças à economia de energia gerada pelo isolamento térmico. Os estudos da ANPE descobriram que há muita pouca alteração nas características do material ao longo da sua vida em edificações, onde nenhuma degradação física e química ocorreu durante o ciclo de vida. Isso demonstra a eficiência do material, que após décadas de aplicação em construções permaneceu eficiente e livre de danos ou defeitos (Guolo et al., 2019).

O poliuretano é muito utilizado em isolamentos não apenas em edificações, mas também na área de refrigeração industrial e de implementos rodoviários. Observando o comportamento desse produto com o passar do tempo, sua durabilidade foi comprovada e

estimada em igual ou maior que a vida útil dos outros produtos e/ou materiais utilizados em conjunto com ele.

A durabilidade é um elemento essencial para estimar os impactos ambientais do poliuretano. Conhecer sua durabilidade é importante, pois por exemplo, em edificações, o mesmo é utilizado para reduzir as trocas de calor entre o edifício e o ambiente, desempenhando um importante papel na determinação dos custos relacionados ao consumo de energia na fase de funcionamento dos edifícios (Guolo et al., 2019).

Deste modo, observa-se que a avaliação de impacto é um processo quantitativo e qualitativo útil para avaliar os efeitos das substâncias, que são suscetíveis ao esgotamento de recursos, efeitos na saúde humana e na conservação do meio ambiente (Guolo et al., 2019).

A indústria de poliuretano está concentrando, cada vez mais, esforços na tentativa de trocar os poliuretanos baseados em petróleo para os de base biológica, ou seja, substituição de polióis baseados em petróleo por outros baseados em óleo natural. Nos últimos anos, espumas rígidas de poliuretano à base de óleo de cozinha de resíduos verdes foram descritas com o objetivo de serem usadas para substituir o poliuretano à base de petróleo utilizado na composição de painéis de isolamento para construção de casas (Enderus & Tahir, 2017).

5. Processos de Reciclagem

De acordo com a norma ASTM D5033, os processos de reciclagem podem ser classificados em (ASTM D5033-00, 2007):

- a) Reciclagem primária: nesse processo ocorre o processamento de sucata de produto plástico em um produto com características semelhantes às do produto original;
- b) Reciclagem secundária: trata-se do processamento de sucata de produto plástico em um produto com características diferentes daquelas do produto original;
- c) Reciclagem terciária: é a produção de produtos químicos básicos ou combustíveis a partir de sucata de plástico segregada ou material plástico que faz parte de um fluxo de lixo municipal de outra fonte;
- d) Reciclagem quaternária: trata-se da recuperação útil do conteúdo de energia da sucata de plástico por seu uso como combustível para produzir produtos como vapor, eletricidade e assim por diante.

A reciclagem de resíduos é uma oportunidade positiva para chegarmos a uma economia caracterizada pelo desenvolvimento sustentável, que auxilie na minimização das contribuições com impacto ambiental negativo (Moya et al., 2013).

Uma das grandes preocupações ambientais é o que fazer com as sobras de produtos. Se tratando da reciclagem do poliuretano, a mesma é uma tarefa complexa, pois durante a fase inicial de produção ocorre um processo de reticulação que evita que o material, uma vez formado, seja submetido à posterior fusão. Desta forma, o poliuretano não pode ser derretido e fundido novamente.

Buscando soluções para esse problema, pensa-se na reciclagem mecânica, onde a matéria-prima deve ser moída em partículas que posteriormente podem ser misturadas com material virgem e compor novos produtos à base de poliuretano ou pode ser aplicada juntamente com outra matéria prima, na confecção de, por exemplo, pisos e/ou revestimento, pistas de atletismo, solados de calçados, blocos de cimento, entre outras aplicações. A reciclagem mecânica apresenta a vantagem de ser um método barato e um processo menos complicado.

Já o poliuretano expandido rígido utilizado em isolamentos, além de possuir uma durabilidade muito grande, ainda pode ser reutilizado como material isolante em outro tipo de construção sem elementos metálicos, recuperação de energia com incineração, recuperação de espuma para realização de aglomerações e eliminação de resíduos. No entanto, a espuma interna não pode ser recuperada para outros aglomerados, pois o gás fica preso no material até o final da vida (Guolo et al., 2019).

Entretanto, a reciclagem do poliuretano ainda é complexa e por esse motivo grande partes dos rejeitos não são recicladas e acabam tendo como fim de vida os aterros sanitários ou a natureza, o que vem a causar danos ao meio ambiente e para as pessoas.

5.1 Reciclagem física

Os processos de reciclagem física incluem a reciclagem primária e a secundária, os quais não modificam a estrutura interna do polímero. Nos processos físicos, os resíduos poliméricos são mecanicamente transformados em flocos, grânulos ou pó para serem utilizados na produção de novos materiais (Isopa, 2001; Simón et al., 2018).

Os processos físicos são usados com sucesso com polímeros termoplásticos, mas são inúteis para o poliuretano termofixo devido à sua natureza termoestável. Os principais processos de reciclagem física do poliuretano são:

a) Reconnectado: os produtos moldados de poliuretano são feitos através de pedaços de espuma de poliuretano flexível picada. É aplicado na produção de carpetes e tapetes esportivos;

b) Moído ou pulverizado: os resíduos de poliuretano são pulverizados e misturados com um dos reagentes virgens para criar novos produtos de poliuretano;

c) Moldagem por compressão: os resíduos de poliuretano são pulverizados e submetidos a altas pressões e calor em um molde, e assim, permite obter até 100% de conteúdo reciclado.

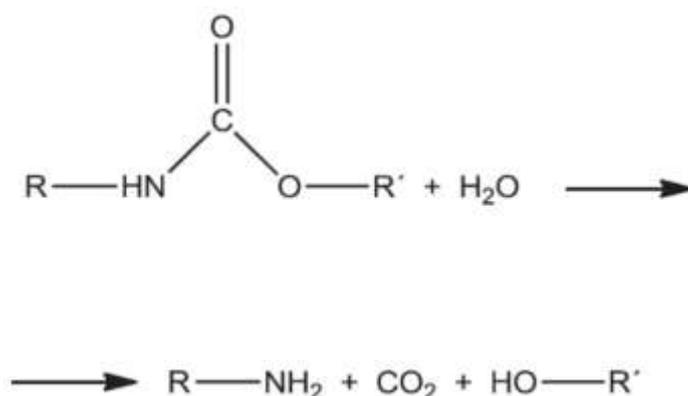
5.2 Reciclagem química

Devido à natureza termoestável da maioria das especialidades de poliuretanos, o processo de reciclagem química tornou-se o processo preferido (Simón et al., 2018). Esse processo permite obter unidades básicas hidrocarbonadas conhecidas como monômeros (reciclagem terciária) que podem ser utilizadas como materiais de síntese na indústria química e petroquímica, e assim, é possível obter produtos de alto valor agregado (Higashi, Taguchi, Kokubo, & Ohta, 1981).

Os processos químicos são os mais interessantes do ponto de vista técnico, econômico e ambiental. Os principais processos de reciclagem química de poliuretanos são:

a) Hidrólise: foi o primeiro processo desenvolvido para reciclar resíduos de poliuretano de forma química. A hidrólise consiste na reação do resíduo de uretano com o vapor de água em uma ampla faixa de pressões e altas temperaturas. Esse processo foi desenvolvido apenas para a reciclagem de resíduos de espuma de poliuretano flexível e, devido à alta entrada de energia necessária para o reator, acabou por não alcançar a escala comercial (Behrendt & Naber, 2009). Atualmente, o futuro dos processos de hidrólise parece estar orientado para a reciclagem ambientalmente correta, empregando a hidrólise em um sistema de CO₂/ água a 8 MPa e 190° C (Motokucho, Nakayama, Morikawa & Nakatani, 2017). No entanto, os elevados custos associados ao emprego de tão altas pressões, tem impedido que este tipo de tecnologia atinja escala comercial. Sua reação pode ser vista na Figura 2.

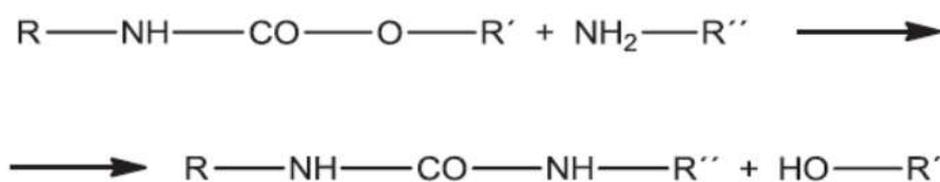
Figura 2 – Reação do processo de hidrólise.



Fonte: Simón et al. (2018),

b) Aminólise: consiste em uma reação de transesterificação, na qual o grupo éster unido ao carbono carbolínico do uretano é trocado pelo grupo amina. Esses processos de aminólise foram descritos apenas para a reciclagem de espumas (flexíveis e rígidas), mas não foram desenvolvidos para os denominados CASEs. No entanto, esses processos de aminólise nunca passaram da fase de pesquisa (Simón et al., 2018). A reação desse processo é vista na Figura 3.

Figura 3 – Reação do processo de aminólise.

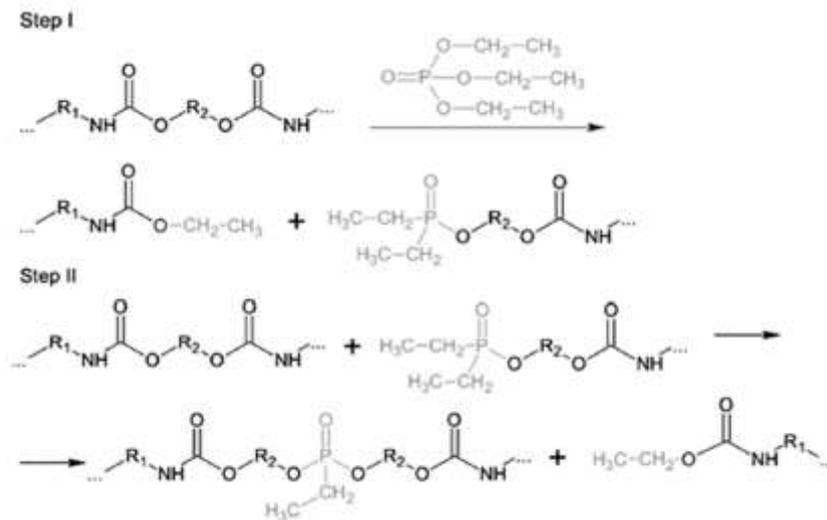


Fonte: Simón et al. (2018).

c) Fosforólise: é uma reação análoga à hidrólise na qual os ésteres dos ácidos fosfônicos ou fosfóricos atuam de maneira semelhante à da água com a formação de um fosfato. A fosforólise permite a obtenção de glicolisados que podem ser utilizados na síntese de poliuretanos com propriedades retardantes de chama devido à funcionalidade fosfato do produto recuperado (Thomas, Datta, Haponiuk & Reghunadhan, 2017). O objetivo global de todos os glicolisados de fosforólise é a possibilidade de serem utilizados diretamente, ou após tratamento químico, para a síntese de poliuretanos com propriedades retardantes de chama ou como aditivos para melhorar a resistência ao fogo de vários polímeros. Porém, semelhante ao caso da aminólise, os processos de fosforólise ainda estão em fase de pesquisa e nenhum novo avanço neste tema foi relatado nos últimos anos (Simón et al., 2018). O esquema da

fosforólise é visto na Figura 4.

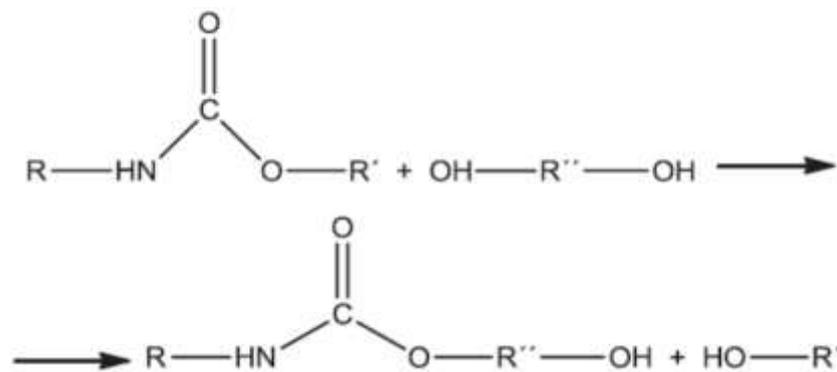
Figura 4 – Esquema do processo de fosforólise.



Fonte: Simón et al. (2018).

d) Glicólise: é o processo de reciclagem química mais amplamente usado para a recuperação de resíduos de poliuretano. Consiste em uma reação de transesterificação, na qual o grupo éster unido ao carbono carbolínico do uretano é trocado pelo grupo hidroxila de um glicol. O processo de reciclagem por glicólise é utilizado nos poliuretanos do tipo elastômeros, revestimentos, espumas rígidas, espumas flexíveis, espumas de molde de injeção de reação e de reação forçada (Simón et al., 2018). A principal reação que ocorre no processo de glicólise é observada na Figura 5.

Figura 5 – Reação do processo de glicólise.



Fonte: Simón et al. (2018).

Isopa (2012), em 2012 descreveu que a maioria dos processos de reciclagem química

de poliuretanos não atingiu a escala industrial e comercial e, entre eles, o processo de glicólise é o que está mais implementado. O processo de hidrólise se encontrava em nível de prontidão tecnológica de planta piloto. Já os processos de aminólise e fosforólise ainda se encontravam em fase de investigação preliminar e escala de pesquisa laboratorial.

Mais atualmente, em 2018, Simón et al. (2018), relatou que os processos de reciclagem química são os ideais para serem empregados na reciclagem do poliuretano, em decorrência da natureza termoestável desses polímeros, e entre eles, o processo de glicólise é aquele que apresenta maior grau de desenvolvimento.

Os processos de glicólise monofásica alcançaram a escala comercial com vários exemplos de sucesso. No entanto, os polióis produzidos nesse processo são capazes de substituir os polióis virgens de espumas rígidas e semirrígidas, mas não são capazes de substituir os polióis de espumas flexíveis, como resultado da não separação de fases. Como consequência a isso, a maioria deles não está operacional no momento. Por outro lado, apesar da alta qualidade dos produtos recuperados obtidos, o grau de desenvolvimento dos processos de glicólise de fase dividida é em escala de planta piloto, em consequência do alto custo associado à quantidade e ao preço dos agentes necessários para garantir uma separação de fase adequada para a obtenção de polióis de alta qualidade (Simón et al., 2018).

Com relação à glicólise, seu nível de desenvolvimento depende do processo de glicólise considerado. Os processos de glicólise de fase dividida que produzem polióis de fase superior com características muito melhores foram desenvolvidos apenas em escala de planta piloto. No entanto, as implantações de melhorias na economia e na eficiência dos processos de glicólise de fase dividida devem liderar mercado de reciclagem química nos próximos anos do ponto de vista ambiental e comercial, facilitando futuramente a implantação industrial da glicólise de fase dividida (Simón et al., 2018).

Em relação a outros processos de reciclagem química industrial de poliuretanos, esses processos requerem uma separação dos resíduos complexa, o que dificulta em grande medida sua aplicabilidade. Seu objetivo é poder obter produtos recuperados de alta qualidade com baixos números de hidroxila, adequados para a síntese de novas espumas de poliuretanos flexíveis (Simón et al., 2018).

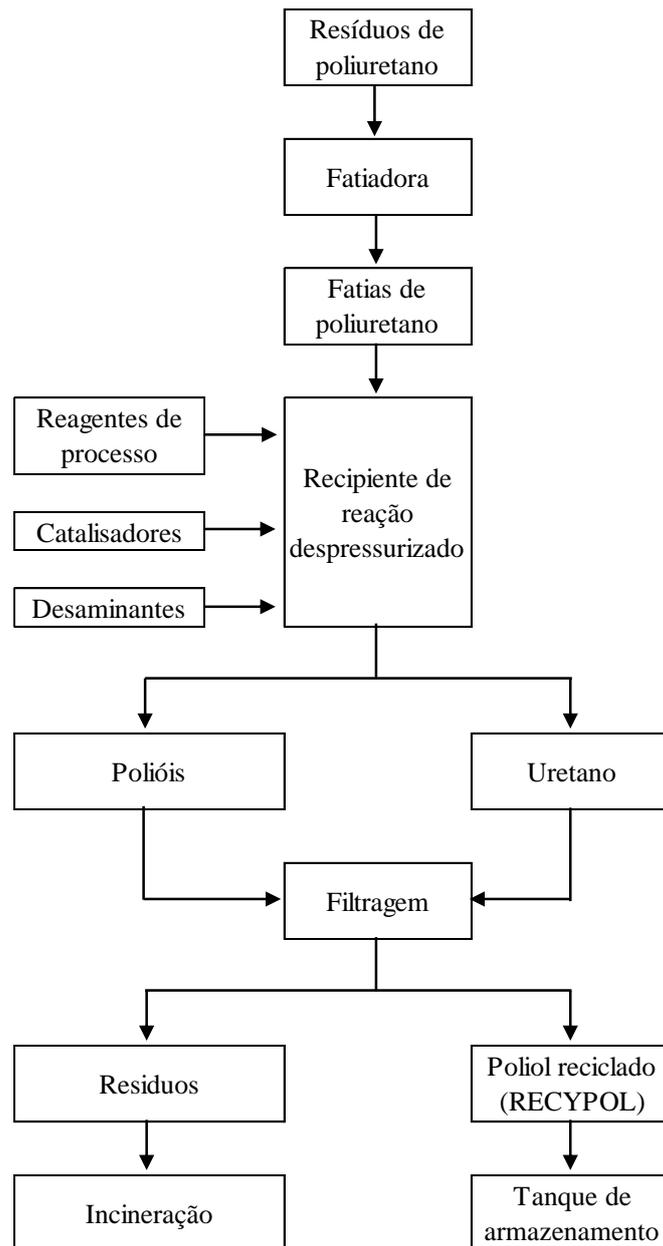
5.3 Processo Rampf e processo H&S

Além dos processos convencionais de reciclagem química de poliuretanos, nos últimos anos vem sendo desenvolvidos diversos processos em escala industrial ou semi-industrial que

consistem em uma associação de tecnologias. As empresas Rampf Ecosystems e H&S Anlagentechnik são as que operam e mais se destacam neste setor atualmente. Ambos os processos são baseados em uma combinação de processos de glicólise, polólise e acidólise dependendo do tipo de resíduo tratado (Simón et al., 2018).

As etapas do processo Rampf estão descritas na Figura 6.

Figura 6 – Fluxograma com etapas do processo Rampf.



Fonte: Autores (2020).

Na Figura 6 observa-se que os resíduos de poliuretano são decompostos em pequenos pedaços (cerca de 5 cm) por uma fatiadora para a produção de polióis recicláveis. Estes são

continuamente introduzidos em um recipiente de reação despressurizado, no qual já existem reagentes de processo, bem como catalisadores e desaminantes. Em temperaturas próximas de 200° C e com agitação constante, as cadeias moleculares de poliuretano são divididas. Após a conclusão do processo de reação, que dura cerca de 7 horas, o líquido resultante, que é uma mistura de polióis e uretano de baixa molécula, é filtrado. Os resíduos da filtração consistem exclusivamente em corpos estranhos incidentais. Estes podem ser facilmente removidos por incineração sem efeitos colaterais e a energia resultante pode ser reutilizada. Por fim, o polioli reciclado produzido é armazenado em reservatórios, conforme solicitação do cliente. O produto final obtido pelo processo Rampf é conhecido como RECYPOL® e pode ser utilizado sozinho ou em mistura com polioli novo para a produção de espumas (Simón et al., 2018).

A H&S Anlagentechnik desenvolveu um processo de reciclagem por meio da associação de tecnologias, distinguindo dois tipos de processos dependendo do tipo de espuma de poliuretano tratada, resíduo de espuma de poliuretano flexível ou rígido. Por meio da tecnologia H&S, os resíduos de espumas flexíveis reagem com uma mistura de ácidos carboxílicos e polioli básico. A H&S afirma que os polióis recuperados obtidos apresentam boa reatividade e não contêm aminas aromáticas primárias (metileno e toluenodiamina) que são perigosas e não são aceitáveis em espumas de cama e estofados (Simón et al., 2018).

No entanto, o processo de H&S requer a separação dos resíduos em caso de diferenças químicas essenciais, e isso apresenta uma limitação operativa para poder obter esses produtos recuperados com baixo número de hidroxilas e adequados para a síntese de novas espumas flexíveis. Assim, H&S recomenda uma coleta e separação de reciclagem para o tratamento de resíduos limpos triturados da produção de placas (resíduos industriais), o que acaba se tornando uma dificuldade (H&S, 2014; Simón et al., 2018).

6. Formas de Reutilização

Os processos industriais geram grandes quantidades de produtos residuais e a maioria deles não tem uso específico e acaba sendo despejada em aterros sanitários (Gadea, Rodríguez, Campos, Garabito & Calderón, 2010). No ano de 2011 o mercado de PU nas regiões da Europa, América e Ásia-Pacífico era de aproximadamente 14,2 milhões de toneladas, com taxa de perecimento estimada de 5,1%, o que representa um aumento para 22,2 milhões de toneladas até o ano de 2020. Em 2012 já havia sido estimado que o mercado brasileiro de poliuretano tenha ultrapassado 350 mil toneladas ano. Em 2014 sua produção era

de aproximadamente 18 milhões de toneladas por ano, o que significa uma produção diária superior a 1 milhão de metros cúbicos (Adema, 2014). Isso gera preocupação, pois será um grande problema de gerenciamento de resíduos depois que esses produtos não serem mais utilizados (Tantisattayakul et al., 2018).

Podem-se identificar três possíveis cenários de fim de vida para o poliuretano: eliminação de resíduos; incineração; recuperação (Guolo et al., 2019). Outra opção de tratamento de resíduo de poliuretano é por hidrólise + aterros. Nessa opção o volume de espuma de poliuretano rígido é reduzido em aproximadamente 90% por um reator de hidrólise, e o restante é transportado para aterros sanitários (Tantisattayakul et al., 2018).

Em relação ao descarte em aterros, existem poucas informações sobre como o poliuretano se comporta nesses locais, já que esse produto possui um grande período de vida, o que é maior de 10 anos. Devido a esse fator e aliado a novas leis ambientais, começou-se a falar muito em desenvolvimento de processos de reciclagem ambiental sustentável (Simón et al., 2018).

Para aumentar a sustentabilidade do poliuretano, minimizar desperdício e impactos ambientais e desviar os vastos volumes atualmente destinados ao aterro, é importante considerar o reuso como o primeiro cenário de fim de vida desse produto. A conversão de resíduos em energia deve ser considerada como última alternativa de “reciclagem” do material, somente quando a espuma de poliuretano tiver atingido o fim de sua vida útil e não puder mais ser utilizada em outros sistemas (Guolo et al., 2019).

Quando se realiza o processo de reciclagem de aparelhos elétricos, a espuma rígida de poliuretano é um resíduo da desmontagem de geladeiras e freezers. Em média, uma unidade de geladeira contém aproximadamente 5 kg de resíduos de poliuretano rígido. Esse valor pode parecer insignificante, porém em países como a Tailândia que possuem uma venda de refrigerados de 1.755.000 unidades / ano, a quantidade de resíduos produzida a partir desses refrigeradores domésticos foi estimada em 8900 toneladas / ano (Tantisattayakul et al., 2018).

A reciclagem de qualquer tipo de plástico para convertê-lo em produtos valiosos é um dos principais desafios da sociedade atual. Uma conquista maior ainda seria se o processo de reciclagem fosse verde. Portanto, é necessário estabelecer procedimentos de reciclagem ou formas de reaproveitamento de resíduos industriais de forma a minimizar seu impacto ambiental.

6.1 Placas recicladas de poliuretano rígido

As espumas de poliuretano podem ser recicladas para a produção de novas espumas, após a redução do pó da matéria-prima. A empresa Sulfibra desenvolveu a placa de poliuretano rígido reciclado, como forma de diminuição dos impactos ambientais causados pelo descarte de resíduos de poliuretanos e pensando na sustentabilidade. Essas placas recicladas são feitas a partir de sobras de poliuretano que seriam lançadas no meio ambiente e apresentam características isolantes semelhantes às de poliuretano virgem, podendo ser utilizadas em assoalhos de câmaras frias e entre várias outras aplicações (Sulfibra, 2020).

6.2 Concreto leve fabricado com adição de espuma rígida de poliuretano

O uso de agregados leves no concreto apresenta muitos aspectos positivos. Kayali (2008) descrevem que a baixa densidade do concreto, devido aos agregados leves, permite reduzir o peso morto de estruturas, tamanhos de sapatas e dimensões de pilares, lajes e vigas. Por consequência, ocorre uma maior disponibilidade de espaço nos edifícios.

Outra vantagem da adição de agregados leves no concreto é que devido às propriedades de baixa transferência de calor do concreto agregado leve, o mesmo fornece maior isolamento térmico e pode melhorar a resistência ao fogo. Além disso, os custos de transporte e equipamentos de manuseio de elementos pré-moldados também são reduzidos (Kayali, 2008).

Do ponto de vista ambiental e energético, a opção de mistura de poliuretano rígido na produção de concreto leve apresentou menor toxicidade humana e menor impacto ambiental, apresentando ainda o benefício de poder gerar lucro (Tantisattayakul et al., 2018).

Os agregados de baixa densidade utilizados em concreto leve podem ser do tipo natural ou do tipo artificial. Os agregados artificiais são aqueles obtidos através de processos industriais específicos ou provenientes de resíduos ou subprodutos. Um exemplo de agregado artificial é pedaços de espuma rígida de poliuretano. Esses agregados leves de espuma de poliuretano, que são incorporados no concreto, são partículas grossas que podem variar de 8 a 20 mm. Por ser um material bastante compressível, sua densidade pode variar de acordo com a pressão exercida (Fraj, Kismi & Mounanga, 2010).

Quando o poliuretano rígido é triturado, ele é convertido em partículas de baixa densidade e assim, podem ser usadas como matéria prima para a fabricação de concreto leve devido à propriedade de isolamento térmico (Yang et al., 2012).

Fraj et al. (2010) realizou inúmeros testes para analisar os efeitos de uma incorporação de resíduos de espuma de poliuretano rígido nas propriedades frescas e endurecidas do concreto. As seguintes conclusões principais puderam ser tiradas:

- a) O concreto de agregado leve com resíduos de espuma de poliuretano foi considerado viável;
- b) Esses concretos apresentaram boa trabalhabilidade, que foi melhorada com o uso de agregados de espuma rígida de poliuretano pré-umedecidos;
- c) O aumento da quantidade de espuma leve gera uma maior porosidade dos concretos, o que facilita a troca de umidade com o meio ambiente e aumenta a retração da secagem, a permeabilidade ao gás e o coeficiente de difusão de cloreto em condições saturadas;
- d) Os concretos leves apresentaram resistência à compressão variando entre 8 e 16 MPa e módulo de elasticidade dinâmico variando entre 10 e 15 GPa;
- e) O concreto leve apresentou redução nas propriedades mecânicas, em comparação com o concreto de peso normal, o que pode estar diretamente relacionada ao aumento no teor de espuma de poliuretano e na quantidade de água de amassamento;
- f) A densidade seca do concreto reduziu de 29 a 36% em comparação com o concreto de peso normal (feito sem resíduos de espuma). Essa redução da densidade também gera o aumento da porosidade total nos concretos leves.

Efeitos negativos na durabilidade do concreto, como permeabilidade aos gases e coeficiente de difusão de cloretos, foram reduzidos com a melhoria das características da matriz cimentícia (Fraj et al., 2010). Assim, concluiu-se que a utilização de resíduo de espuma de poliuretano rígido na fabricação de concretos agregados leves apresentou bons resultados. Isso é vantajoso, pois pode ajudar a reduzir o custo por unidade de volume do concreto.

6.3 Argamassa leve feita com espuma de poliuretano reciclado

Gadea et al. (2010) descreveu o estudo da utilização de resíduos de espuma rígida de poliuretano com misturas à base de cimento na produção de argamassas leves. Esses resíduos foram obtidos da destruição de painéis usados na indústria automotiva, a qual gera uma grande quantidade de resíduos resultantes da fabricação de painéis rígidos de espuma de poliuretano.

Quando os resíduos de espuma de poliuretano são destruídos e triturados, eles são convertidos em partículas de baixa densidade que podem ser úteis na fabricação de materiais leves. A adição desses resíduos à argamassa leve e concreto é uma alternativa potencialmente

viável para sua disposição (Gadea et al., 2010).

Na avaliação de Gadea et al. (2010), o poliuretano rígido foi triturado em tamanhos de partículas que variaram de 0 a 4 mm antes de usar como um substituto agregado. Os resultados mostram que o aumento da quantidade de poliuretano afeta a argamassa, diminuindo sua densidade e propriedades mecânicas e aumentando sua trabalhabilidade, permeabilidade e teor de ar ocluído. A quantidade de espuma presente na composição é o fator mais importante para explicar a variação nas propriedades subsequentes desses compósitos.

A argamassa produzida com poliuretano reciclado é comparável à argamassa leve feita com materiais tradicionais (Gadea et al., 2010). Desta forma, podemos concluir que é possível usar espumas poliméricas de resíduos industriais na fabricação de argamassas à base de cimento e que estas podem ser úteis na indústria de construção. Além disso, essa argamassa leve pode ser considerada como material ecológico e contribui para o desenvolvimento sustentável.

6.4 Fabricação de pranchas

A cadeia produtiva da indústria de pranchas de surfe gera impactos negativos ao meio ambiente devido à geração de resíduos, sendo o principal deles o poliuretano. Na cidade de Florianópolis (Santa Catarina/Brasil), buscou-se reaproveitar resíduos de poliuretano decorrentes do processo de fabricação de pranchas e para isso foram levantadas informações a respeito do processo produtivo.

No processo de fabricação das pranchas ocorre três macro processos, que são: shape; pintura; laminação. Na etapa de shape, o bloco de poliuretano recebe o formato da prancha a partir da usinagem e acabamento. Nesta etapa ocorre a geração de resíduos de poliuretano em pedaços e em pó. Na etapa de pintura ocorre a aplicação de tintas e vernizes no bloco. Por fim, a etapa de laminação é a responsável pelo capeamento do bloco com fibra de vidro e resinas de poliéster. Tanto na etapa de pintura quanto na etapa de laminação não há geração de resíduos (Barcelos et al., 2020).

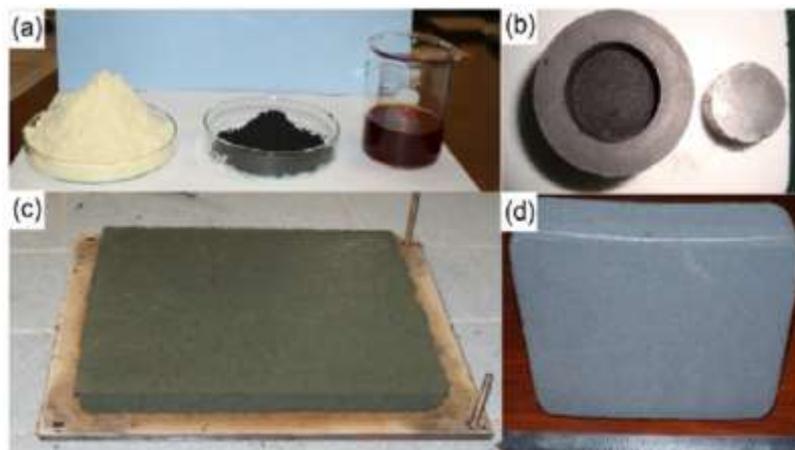
Os rejeitos desse material gerados na etapa de shape foram reutilizados como matéria-prima para a fabricação de novos blocos para confecção de pranchas de surf. A incorporação do resíduo de poliuretano na fabricação de placas mostrou bons resultados em laboratório, com grandes chances da reutilização do resíduo na fabricação de uma nova prancha, sendo necessária melhoria das propriedades mecânicas de tração do material. Além disso, essa

reutilização ajuda a reduzir o volume de resíduos encaminhados para aterros industriais ou sanitários, minimizando os impactos negativos ao meio ambiente e objetivando uma produção mais limpa (Barcelos et al., 2020).

6.5 Geração de espuma de carbono com propriedades à prova de fogo

Os resíduos de placas de poliuretano rígido foram misturados com resina novolac e piche de alcatrão de carvão e formaram uma espuma de carbono leve, com densidade de 0,57 g/cm³. Uma variante desse processo utilizou resina resole residual da planta de fabricação de prepreg no lugar da resina novolac, para economizar ainda mais o processo. Essas misturas foram submetidas à moldagem, cura e carbonização sem o uso de gás de proteção. A Figura 7 apresenta as etapas do processo.

Figura 7 – Etapas de processamento de espuma de carbono utilizando poliuretano rígido residual.



Fonte: Farhan et al. (2016).

Na Figura 7 (a) observa-se a matérias-primas, na Figura 7 (b) o molde preenchido com a mistura, na Figura 7 (c) já é possível observar a espuma verde desmoldada e pôr fim a Figura 7 (d) apresenta a espuma carbonizada a granel.

As aparas de espuma de poliuretano foram usadas como um formador de poro principal, a resina novolac e a resina resole residual foram utilizadas como aglutinante e o piche de alcatrão de carvão foi usado como aditivo. Esses precursores em pó foram moldados e pirolisados a 1100 °C sob a cobertura da brisa do coque que eliminou o uso de qualquer gás inerte externo.

Realizou-se o teste de fogo das espumas de carbono, sob temperaturas ultra altas, e

observou-se que a amostra não queimou e permaneceu mais fria na outra extremidade. Esse resultado é muito encorajador em termos de capacidade de isolamento de superfície, refletida em uma temperatura muito baixa da face posterior. Uma alta resistência específica e uma condutividade térmica muito baixa torna o resíduo de espuma de carbono à base de poliuretano rígido ideal para estruturas de alta temperatura e isolamento térmico.

A amostra testada não apresenta falha estrutural como rachaduras ou queimaduras. Além disso, esta espuma de carbono foi considerada um material confiável para o projeto de ablativos inovadores e térmicos sistemas de proteção, pois apresentaram taxas de ablação em massa e erosão lineares muito baixas, produção de tamanho a granel, uso de materiais residuais, simplicidade e carbonização sem um gás de proteção (Farhan et al., 2016).

7. Conclusão

Para a melhoria da sustentabilidade, conclui-se que as principais formas de reutilização do poliuretano são: geração de placas recicladas de poliuretano rígido; adição da espuma rígida de poliuretano em concreto, o que gera o nomeado concreto leve; adição de espuma em argamassa, formando a denominada argamassa leve; fabricação de pranchas; geração de espuma de carbono com propriedades à prova de fogo.

A crescente utilização desse produto, em função da sua gama de aplicação, tem gerado uma quantidade proporcional de resíduos sólidos. Desta forma, conclui-se que a melhor solução para essas aparas de poliuretano é a reutilização. O descarte em aterros apresenta o menor impacto de mudança climática e esgotamento fóssil, porém apresenta a desvantagem de requerer muito espaço, devido à baixa densidade do poliuretano. Já a incineração causa impacto ambiental e forma substâncias altamente tóxicas. Assim, cada vez mais precisam ser desenvolvidas técnicas de reaproveitamento, que possibilitam o reuso desses rejeitos e ainda poderão trazer benefício econômico para as empresas, aumentando a sua sustentabilidade.

Esta pesquisa se limitou a um estudo teórico focado nos processos de reciclagem do poliuretano, sendo necessária uma análise mais ampla sobre mais processos de reciclagem, bem como, uma avaliação econômica de sustentabilidade. A melhor opção para a reciclagem do poliuretano precisa ser testada através de uma avaliação prática da viabilidade técnica.

Referências

- Adema (2014). *Panorama du marché du polyuréthane et état de l'art de ses techniques de recyclage*. Recuperado de https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/a13473_1202c0079_etude_polyurethane.pdf
- ASTM D5033-00 (2007). *Standard Guide for Development of ASTM Standards Relating to Recycling and Use of Recycled Plastics* (Withdrawn 2007).
- Barcelos, R. L., Cubas, A. V., Aguiar, A. R., Silva, L., Leripio, A. A., Magnago, R. F. (2020). Confecção e Avaliação das Propriedades de Placas de Poliuretano com Aproveitamento de Resíduo da Fabricação de Pranchas. *5Th International Workshop | Advances In Cleaner Production – Academic Work*, São Paulo, p. 1-10.
- Behrendt, G., & Naber, B. W. (2009). The chemical recycling of polyurethanes (review). *Journal Of The University Of Chemical Technology And Metallurgy*. 44(1), 3-23.
- Cangemi, J. M., Santos, A. M., Claro Neto, S. (2009). Poliuretano: de travesseiros a preservativos, um polímero versátil. *Química Nova na Escola*. 31, 3, 159-164.
- Enderus, N. F., & Tahir, S. M. (2017). Green waste cooking oil-based rigid polyurethane foam. *Iop Conference Series: Materials Science and Engineering*, 271. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/271/1/012062>.
- Farhan, S., Wang, R., Jiang, H., & Li, K. (2016). Use of waste rigid polyurethane for making carbon foam with fireproofing and anti-ablation properties. *Materials & Design*, 101, 332-339. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.008>.
- Fraj, A. B., Kismi, M., & Mounanga, P. (2010). Valorization of coarse rigid polyurethane foam waste in lightweight aggregate concrete. *Construction And Building Materials*, 24(6), 1069-1077. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.11.010>.

Gadea, J., Rodríguez, A., Campos, P. L., Garabito, J., & Calderón, V. (2010). Lightweight mortar made with recycled polyurethane foam. *Cement And Concrete Composites*, 32(9), 672-677. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.017>.

Guolo, E., Cappelletti, F., Romagnoni, P., & Raggiotto, F. (2019). Environmental impacts for polyurethane panels. *E3S Web Of Conferences*, 111. EDP Sciences. <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/201911103063>.

H&S (2014). *Innovative approach to conversion of flexible PU foam residues into polyol on an industrial scale*. Feiplar Composites & Feipur, November 2014, Sao Paulo, Brasil.

Higashi, F., Taguchi, Y., Kokubo, N., & Ohta, H. (1981). Effect of initiation conditions on the direct polycondensation reaction using triphenyl phosphite and pyridine. *Journal Of Polymer Science: Polymer Chemistry Edition*, 19(11), 2745-2750. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/pol.1981.170191109>.

Isopa (2001). *Recycling and Recovery Polyurethanes: Rebonded Flexible Foam*. Recuperado de http://www.isopa.org/media/1104/isopafactsheet_recycling_and_recoverypolyurethanes_v02.pdf.

Isopa (2012). *Recycling and Recovery Polyurethanes: List of fact sheet references with suggested reading material*. Recuperado de <https://www.isopa.org/media/2612/list-of-fact-sheet-references-with-suggested-reading-material.pdf>.

Kayali, O. (2008). Fly ash lightweight aggregates in high performance concrete. *Construction And Building Materials*, 22(12), 2393-2399. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.09.001>.

Motokucho, S., Nakayama, Y., Morikawa, H., & Nakatani, H. (2017). Environment-friendly chemical recycling of aliphatic polyurethanes by hydrolysis in a CO₂-water system. *Journal Of Applied Polymer Science*, 135(8). Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/app.45897>.

Moya, C., Domínguez, R., Langenhove, H. V., Herrero, S., Gil, P., Ledón, C., & Dewulf, J. (2013). Exergetic analysis in cane sugar production in combination with Life Cycle. *Journal of Cleaner Production*, 59, 43-50.

Simón, D., Borreguero, A. M., Lucas, A. de, & Rodríguez, J. F. (2014). Glycolysis of flexible polyurethane wastes containing polymeric polyols. *Polymer Degradation And Stability*, 109, 115-121. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2014.07.009>.

Simón, D., Borreguero, A. M., Lucas, A. de, & Rodríguez, J. F. (2015). Glycolysis of viscoelastic flexible polyurethane foam wastes. *Polymer Degradation And Stability*, 116, 23-35. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2015.03.008>.

Simón, D., Borreguero, A. M., Lucas, A. de, & Rodríguez, J. F. (2018). Recycling of polyurethanes from laboratory to industry, a journey towards the sustainability. *Waste Management*, 76, 147-171. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2018.03.041>.

Somarathna, H. M. C. C., Raman, S. N., Mohotti, D., Mutalib, A. A., & Badri, K. H (2018). The use of polyurethane for structural and infrastructural engineering applications: a state-of-the-art review. *Construction And Building Materials*, 190, 995-1014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.166>.

Sulfibra (2020). *Placas de Poliuretano PUR*. Recuperado de <http://www.sulfibra.com.br/produtos>.

Tantisattayakul, T., Kanchanapiya, P., Methacanon, P. (2018). Comparative waste management options for rigid polyurethane foam waste in Thailand. *Journal Of Cleaner Production*, 196, 1576-1586. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.166>.

Thomas, S., Datta, J., Haponiuk, J., & Reghunadhan, A. (2017). *Polyurethane Polymers: blends and interpenetrating polymer networks*. Amsterdam: Elsevier.

Yang, W., Dong, Q., Liu, S., Xie, H., Liu, L., & Li, J. (2012). Recycling and Disposal Methods for Polyurethane Foam Wastes. *Procedia Environmental Sciences*, 16, 167-175. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.023>.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

André Carlos Grotto – 50%

Marcelo Hemkemeier – 30%

Maiara Vizioli Rossato – 20%