

Tratamientos de reciclaje aplicados al residuo de espuma rígida de poliuretano (PUR): Artículo de revisión

Recycling treatments applied to rigid polyurethane foam (PUR) waste: Review article

Isabella López-Rodríguez ^{1a}, Joseph Alejandro Diaz-Saavedra ^{1b}, Janneth Torres-Agredo ^{1c}

¹ Grupo de investigación Materiales y Medio Ambiente GIMMA, Facultad de Ingeniería y Administración, Universidad Nacional De Colombia, Colombia. Orcid: 0000-0002-4094-83872 ^c. Correo electrónico: iflopezr@unal.edu.co ^a, Joadiazsa@unal.edu.co ^b, jtorresa@unal.edu.co ^c

Recibido: 1 diciembre, 2023. Aceptado: 20 septiembre, 2024. Versión final: 22 noviembre, 2024.

Resumen

La espuma rígida de Poliuretano es un material sintético que se genera mediante la reacción entre un polioli y un isocianato, que cuenta con excelentes propiedades termoaislantes; sus aplicaciones generan un residuo, el cual es considerado en Colombia, como un residuo peligroso. Por tal motivo, el presente artículo consiste en una revisión bibliográfica sobre las diferentes metodologías de reciclaje aplicados para el residuo de espuma rígida de poliuretano (PUR). Se expondrán alternativas desde el ámbito de reciclaje químico, mecánico y de recuperación de energía o térmicos, incluyendo además tratamientos de índole biológico. A partir de los reportes de la literatura se evidencia que el reciclaje mecánico se destaca por su simple aplicación y bajos costos. Por otro lado, el tratamiento químico ofrece más alternativas para la incorporación de ciertos productos a líneas de producción; sin embargo, se dificulta la alta tecnología necesaria para su aplicación. Situación similar a los tratamientos biológicos, cuyo ciclo de vida de los microorganismos es fundamental para su aplicación. Mientras la recuperación de energía o tratamientos térmicos presentan una buena oportunidad de energía sostenible, no obstante, sus emisiones son un factor a vigilar. Todas las alternativas de reciclaje permiten generar una economía circular sostenible en el tiempo, disminuyendo el impacto negativo del residuo sobre la salud de las personas y el medio ambiente.

Palabras clave: Espuma rígida de poliuretano; reciclaje; polímeros; tratamientos; contaminación.

Abstract

Polyurethane rigid foam is a synthetic material that is generated by the reaction between a polyol and an isocyanate, which has excellent heat-insulating properties; its applications generate a waste, considered in Colombia a dangerous waste. For this reason, this article is a bibliographic review about the different recycling methodologies applied to rigid polyurethane foam waste (RPF). Alternatives will be presented from the field of chemical, mechanical and energy recovery, or thermal recycling, also including biological treatments. The articles reports that mechanical recycling stands out for its simple application and low costs. On the other hand, chemical treatment offers more alternatives for incorporating the waste in certain process; however, the high technology necessary for its application is difficult. Situation similar is reported to biological treatments, whose life cycle of microorganisms is essential for their

application. While energy recovery or thermal treatments present a good opportunity for sustainable energy, however, their emissions are a factor to be careful with. All recycling alternatives allow us to generate a circular economy that is sustainable over time, reducing the negative impact of waste on people's health and the environment.

Keywords: Rigid polyurethane foam; recycling; polymers; treatments; contamination.

1. Introducción

La espuma rígida de poliuretano (PUR) es el resultado de una reacción química exotérmica entre un diol de poliéster y un diisocianato; cuyo descubrimiento se realizó en el año 1937 por Otto Bayer, y fue considerado inútil inicialmente a nivel industrial [1].

Dicha reacción entre diol y diisocianato puede dar como resultado diferentes estructuras de poliuretano, sea rígida o flexible según el aditivo espumante. Estas espumas de poliuretano rígidas y flexibles representan entre el 32% y 36% de la producción de poliuretano a nivel mundial, respectivamente [2]. Estas espumas tienen múltiples usos que van desde la espuma flexible en muebles tapizados, a la espuma rígida como aislante en paredes, techos y electrodomésticos; pasando por el poliuretano termoplástico utilizado en dispositivos médicos y calzado, hasta revestimientos, adhesivos, selladores y elastómeros utilizados en suelos e interiores de automóviles [3].

Debido precisamente a la amplia aplicación de PUR en la industria, se presenta una generación persistente de desechos sólidos en el medio ambiente. Los autores mencionan que “de un total de 70 muestras recolectadas en una playa británica, Turner y Lau encontraron 39 piezas de productos de plástico PU espumado” [4].

Por otro lado, para la eliminación de los plásticos se requiere un costo monetario alto, sin contar con el daño al ambiente que conlleva alternativas realizadas actualmente de manera irresponsable como la generación de gases tóxicos derivada de la incineración y la permanente acumulación en vertederos [5]. De hecho, se reportan estudios donde se menciona que “de todo el plástico producido desde principios de la década de 1950, menos del 10% se ha reciclado o reutilizado, con el consiguiente impacto económico y medioambiental, debido a la pérdida de recursos y a la eliminación de la cadena de valor” [6].

En este orden de ideas, mundialmente se han desarrollado estudios referentes a encontrar disposiciones de PUR, alternativas a las tradicionales, que permitan darle al residuo un valor agregado que lo reintegre a las diferentes cadenas de producción. De esta manera, el presente artículo de revisión busca agrupar alternativas de manejo al residuo, en tratamientos biológicos, tratamientos

químicos, tratamientos mecánicos y tratamientos térmicos, con el fin analizar su potencial aplicación posconsumo.

2. Metodología

Se llevó a cabo una búsqueda de bibliografía en bases de datos académicas y científicas tales como Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, SciELO y ScienceResearch, utilizando la palabra clave de búsqueda “rigid polyurethane foam waste” en una ecuación con “AND” junto con las palabras “degradation”, “recycling”, “chemical - mechanical - biologic treatment”, “characterization”, “pyrolysis” y “energy recovery”.

Dentro de los artículos encontrados se priorizaron los estudios que han sido publicados en los últimos 20 años, con el fin de presentar una información más relevante y actualizada a los desarrollos científicos.

Una vez recopilados y revisados los artículos científicos referentes a los diferentes métodos de degradación del PUR, la información fue organizada en las siguientes categorías: Tratamientos biológicos, tratamiento químico, tratamiento mecánico y tratamiento térmico.

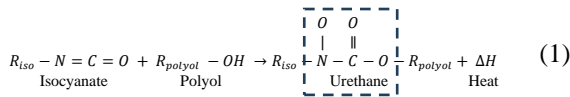
Cada categoría de los métodos de degradación fue revisada a detalle, considerando las condiciones de los procesos, productos resultantes y, en algunos casos, ventajas y desventajas del tratamiento analizado. Para posteriormente realizar una síntesis de la información recopilada para destacar los avances de la degradación del PUR, así como para identificar las limitaciones y también las áreas de investigación futura.

Por último, se extrajeron los datos más relevantes de los estudios realizados respecto a las propiedades fisicoquímicas de los productos resultantes en los diferentes métodos de tratamiento, con el fin de identificar usos potenciales del residuo, ya sea en procesos de reciclaje, como también la obtención de materiales o compuestos reutilizable

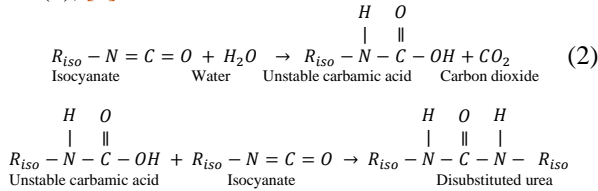
3. Resultados

Durante la síntesis de la PUR se utilizan 2 componentes principales, un polioliol y un isocianato; dos compuestos cuya reacción es exotérmica y conlleva a la formación de

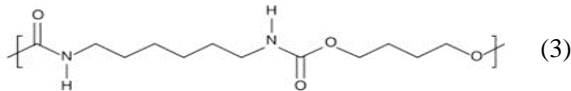
enlaces de uretano, como se muestra continuación en (1), [7].



Adicional a esta reacción, el isocianato reacciona con el agua en un proceso llamado expansión, lo cual conlleva a la generación de ureas modificadas, como se muestra en (2), [7].



La estructura final obtenida observada en (3) se caracteriza por la repetición del grupo funcional uretano (-NH-CO-O-), el cual es responsable de la estructura rígida de la espuma mediante los puentes de hidrógeno intermoleculares que otorgan rigidez y cohesión a las cadenas de polímeros. Además de esto, de buena resistencia a la combustión y propiedades tanto de reactividad como de adherencia, características que condicionan los tratamientos explorados para la disposición final de este tipo de material [8].



3.1. Tratamientos biológicos

Dentro de los procesos biológicos se encuentra la degradación enzimática, para la cual la espuma rígida de poliuretano no presenta una despolimerización completa, debido a la cantidad de enlaces recalcitrantes que tiene en su estructura (por ejemplo, enlaces carbamato, amida y éter) [9].

Sin embargo, se tienen estudios realizados para la detección de enzimas con potencial degradante eficientes capaces de desensamblar cadenas de polímeros PUR en compuestos oligo y monoméricos. Dentro de los resultados de diferentes autores, se pueden destacar esterasa, lipasa, cutinasa e hidrolasa de uretano [10] así como la lacasa, la cual es perteneciente al grupo de oxidasas de cobre azul [2]. Dentro de las técnicas estudiadas para la obtención de enzimas degradantes, se encuentran algunas como la obtención de proteasa y lipasa mediante la disección de los tractos digestivos de abejas carpinteras japonesas *Xanthomonas sp* [11]. La

Figura 1 muestra los resultados de esta última investigación mencionada.

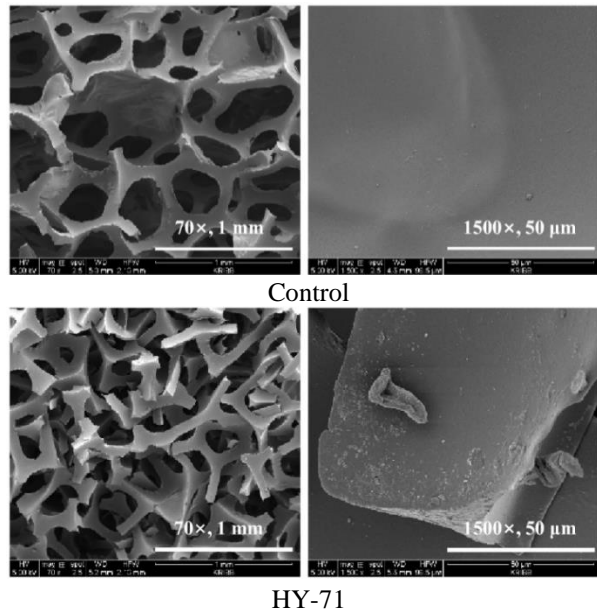


Figura 1. Imágenes SEM de la espuma de control y la espuma tratada con las zepa de los microorganismos de los tractos digestivos de abejas carpinteras japonesas *Xanthomonas sp*. Fuente: [11].

Mediante el ensayo de Microscopía electrónica de Barrido (SEM) (ver Figura 1), se puede observar como la espuma tratada presenta grietas y daños en la estructura original por la actividad microbiana.

Además de las enzimas, dentro de los tratamientos de biodegradación de polímeros los autores mencionan cinco tipos de procesos: (1) colonización, (2) formación de película condicional, (3) asimilación, (4) biofragmentación y (5) mineralización [12]. De las cuales se presentarán algunos ejemplos.

Por un lado, diversos autores han realizado investigaciones con base en la degradación microbiológica, la cual se basa en la formación de biopelículas en la superficie de los polímeros por adhesión, de forma que el material posteriormente constituye una fuente de carbono y nitrógeno para los mismos microorganismos una vez colonizado [13]. Sin embargo, ciertos autores han detectado la degradación del material por efectos de la hidrólisis, generando liberación de aminas, con baja presencia de microorganismos, llegando a la idea de que factores como humedad y temperatura favorecen otro tipo de procesos degradantes de la espuma [14].

Teniendo en cuenta que la PUR constituye una fuente de carbono y nitrógeno, se ha planteado la alternativa de usarlas como matrices de inmovilización para el desarrollo de bacterias degradantes o absorbentes de diferentes sustancias de interés o para tratamiento de aguas, como el ácido-H donde se obtuvo hasta el 100% de absorción [15] o el azul de metileno con el cual se obtuvo hasta un 97% de absorción [16]. La biooxidación de tiosales es otra alternativa bajo la cual se ha evaluado el uso de residuos PUR como base de crecimiento de bacterias sulfurooxidantes para tratamientos de aguas utilizadas en procesamiento de minerales sulfurados. Los resultados demuestran que la conversión de tiosales se puede controlar a partir del caudal de líquido y es factible la eliminación total de tiosales [17].

Investigadores colombianos evaluaron igualmente el uso como soporte de las PUR para el desarrollo de bacterias degradadoras de petróleo. Los autores establecieron un consorcio bacteriano potencialmente degradador de petróleo conformado por *Bacillus sp.*, *Pseudomonas sp.*, *Serratia sp.*, *Enterobacter sp.* y *Raoultella sp.*, que redujeron la concentración de los HTP (hidrocarburos totales de petróleo) en un 33% [18]. Sin embargo, es importante resaltar que este estudio evidenció la diferencia en el porcentaje de absorción de la sustancia de interés dependiendo de la PUR, si esta es biodegradable o petroquímica, añadiendo además un

riesgo de contaminación cruzada para el caso de la espuma petroquímica [18]. Continuando con los organismos de los cuales se tienen resultados referentes a su capacidad degradante de la PUR, se presentan estudios de hongos como el hongo *Cladosporium tenuissimum* A3.I.1, junto con una comunidad microbiana conformada por *Paracoccus sp.*, *Chryseobacterium sp.*, *Parapedobacter sp.*, *Microbacteriaceae bacterium*, y *Ochrobactrum intermedium*. De los métodos se detectó proliferación en las muestras de PUR, siendo el hongo del cual se evidenció un cubrimiento total de la superficie de la espuma en el tercer día del experimento, lo cual lleva a concluir que las muestras de PUR no presentan características tóxicas que impidieron su desarrollo [19].

En este orden de ideas, otros autores han establecido el potencial de hongos como *Embarria clematidis*, el hongo marino *Cladosporium haloterans*, además de las bacterias *Paracoccus* y *Acinetobacter* como degradadores potenciales de PUR [20]. En algunos estudios se ha logrado un índice de degradación del 80 % de PU después de 72 h a 28 °C [21].

La Figura 2 ilustra una explicación respecto al efecto del metabolismo del hongo *Cladosporium haloterans* sobre la PUR para la producción de energía.

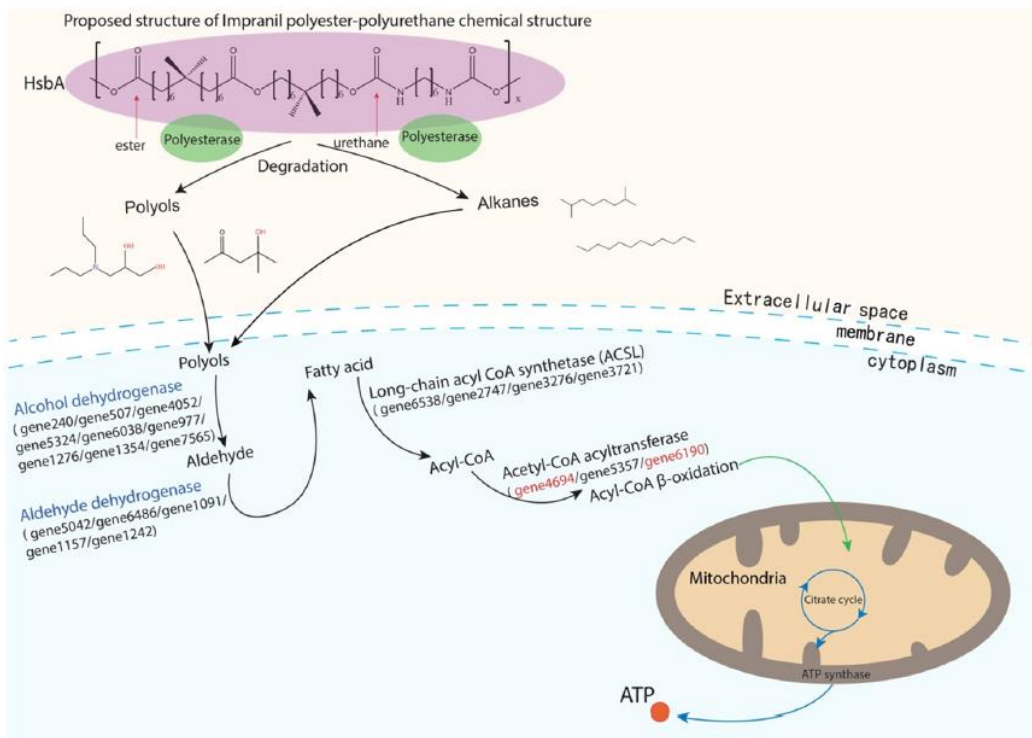


Figura 2. Modelo propuesto para la degradación de PUR por el hongo *Cladosporium haloterans*. Fuente: [21].

El autor expone en la **Figura 2** que la expresión fúngica de la proteína extracelular HsbA y poliesterasas son inducibles en presencia de PUR. HsbA se absorbe en la superficie hidrofóbica del PU y conduce al reclutamiento de poliesterasas extracelulares que atacan los enlaces de uretano. Los polioles intermedios de la degradación se convierten en ácidos alcohol y aldehído deshidrogenasas. Expresión de genes relacionados con las vías de ácidos grasos es inducida por la PUR (en caracteres rojos) y generan acetil-CoA, que entra en el ciclo del ciclo del citrato para generar ATP, es decir, energía [21].

Por otro lado, otra alternativa interesante que se ha comenzado a estudiar para la degradación del material es mediante la aplicación de luz ultravioleta, la cual ha demostrado que ciertas partes de la estructura geométrica de PUR se degradan más rápido que otros y que esta degradación es suficiente para permitir que los gases contenidos dentro de estas capas se evaporen [22], siendo los enlaces de C-N y N-H los principales alterados bajo los rayos UV [2].

3.2. Tratamiento químico

Dentro de los tratamientos químicos utilizados para la degradación de PUR se encuentran los procesos de alcoholólisis, en los cuales diversos autores han implementado el uso de diferentes compuestos para descomponer el residuo y utilizarlo como materia prima con el fin de producir espuma rígida de PUR reciclada. En el proceso de degradación se empleó un agente de alcoholólisis compuesto por propilenglicol y etanolamina como catalizadores de la reacción. Los polioles oligómeros que se obtuvieron en el producto de la reacción se mezclaron con lignina para elaborar una espuma rígida de PUR que cuenta con excelentes propiedades mecánicas, térmicas, así como también alta resistencia a la compresión, gran rendimiento en el aislamiento térmico, entre otros [23]. Los autores también exponen que, la espuma de PU elaborada por medio de reciclaje químico, presenta mejores propiedades mecánicas en comparación de los PU que contienen solo poliéter polioles puros, debido a que son elaborados con polioles polieteres y polioles aromáticos, logrando mayor estabilidad en su estructura, ambas estructuras fueron analizadas mediante espectroscopía infrarroja, donde identificaron picos de absorción en las diferentes espumas de PU con diferentes proporciones de agentes de alcoholólisis, los cuales se evidencian en la **Figura 3**.

Así mismo, algunos autores lograron degradar el PUR sometiéndolo a condiciones específicas, usando como agente catalizador el acetato de litio, dando como resultado una capa líquida de poliéter polioliol, la cual se

pudo evidenciar en espectroscopía infrarroja (FTIR), análisis termogravimétrico, resonancia magnética nuclear (RMN) y cromatografía de permeación en gel (GPC) [24]. Por otra parte, diversos autores emplearon un catalizador de metal alcalino, en este caso es el hidróxido de cesio, acompañado de dos agentes de alcoholólisis (glicerol y butanodiol), degradando la espuma bajo condiciones controladas, lograron recuperar polioliol y polioliol polieter que, al mezclarlo con un agente espumante, lograron elaborar espuma de PUR reciclada que cumple con estándares internacionales [25]. Otros autores mencionaron que, el uso de diglicerol como agente alcoholizante, permite reciclar el poliéter polioliol con altos índices de pureza, el cual puede reemplazar al poliéter polioliol virgen en la elaboración de nuevas espumas de PU hasta en un 50% [26].

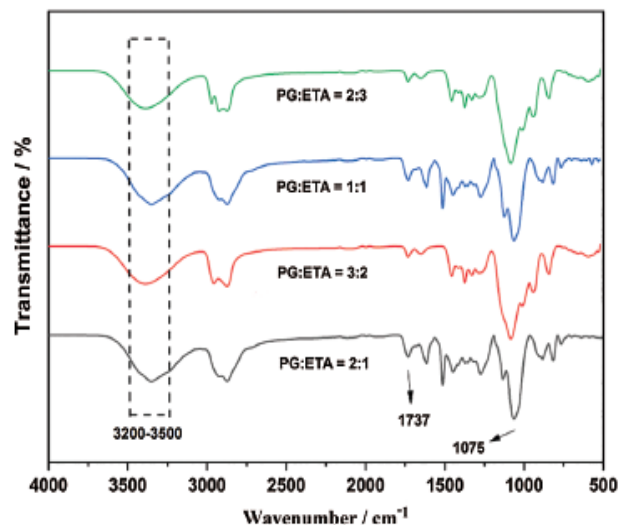


Figura 3. Espectroscopía infrarroja de PUR con diferentes proporciones de agentes de alcoholólisis.

Fuente: [23].

Algunas investigaciones han demostrado que las reacciones de degradación del PUR son más eficientes cuando se someten a temperaturas controladas, ya que permiten modificar sus características físico-químicas [27], esto se realiza con el fin de poder incorporar los productos obtenidos en procesos industriales, en este caso, los polioles oligómeros, ya sea en la elaboración de PUR reciclado [23], como también usarlo a manera de combustible alternativo de energía renovable [28].

Existen otros estudios que demostraron la eficiencia de la degradación del PUR usando métodos más ecológicos, como la hidroglicólisis, algunos autores usaron sorbitol como solvente [29], mientras que otros autores emplearon el hidróxido de sodio e hidróxido de potasio como solventes y catalizadores, arrojando resultados

positivos visibles en espectroscopía infrarroja (FTIR) [30].

La aplicación de la glucólisis para degradar la espuma de PU se ha convertido en una metodología importante e innovadora para conservar parte de la materia prima original [31]; estudios realizados han implementado el uso de dietanolamina, n-butóxido de titanio y sales de octoato para obtener la mayor parte de polioles que surgen producto de la reacción de glucólisis [32]. En algunos estudios también se emplea el uso de la hidrólisis para recuperar parte del grupo isocianato [33], el cual se pierde en gran parte durante la degradación de la espuma [34].

Por otra parte, diversos autores han publicado estudios de degradación del PUR realizados con un solvente orgánico (Tolueno) utilizando una enzima (Lipasa), evidenciando resultados positivos en la degradación del PU con cadena de poliéster alifático [35]. Vale la pena mencionar que la degradación del PU por medio de enzimas desempeña un papel importante en la industria para la producción de PU verdes y sostenibles [36].

Algunas espumas de PU a base de isocianato de metilendifenilo (MDI), lograron descomponerse con alcanolaminas sin el uso de un catalizador, obteniendo dos capas, en la primera capa se obtuvo poliéter polioliol, compuesto mencionado en párrafos anteriores y en la segunda capa se obtuvo metilendifenilamina, el cual es un derivado de la alcanolamina, ambos compuestos fueron observados por cromatografía de permeación en gel [37].

3.3. Tratamiento mecánico

Otra de las alternativas para el aprovechamiento de PUR son los tratamientos mecánicos, donde el objetivo es el reciclaje del material mediante la adición de éste al concreto o mortero, una opción con ventajas ecológicas y económicas [38]. Dichos tratamientos se basan en someter los residuos a procesos de molienda para convertirlos en partículas de baja densidad que al ser agregadas a las matrices cementicias, permiten obtener un material ligero y mejorado en propiedades de aislamiento térmico y acústico (debido a la naturaleza aislante de la espuma) [39].

En este orden de ideas, los estudios direccionados a estos tratamientos analizan la relación entre el porcentaje de PUR agregado (reemplazando la arena gruesa usada normalmente para la fabricación de morteros) versus la variación de propiedades específicas como la frecuencia natural y el amortiguamiento. Algunos autores realizaron reemplazos del 10%, 30% y 60% de la arena por PUR

para medir esta capacidad de amortiguamiento mediante pruebas de vibración libre. Los resultados no presentan una tendencia, ya que con reemplazo del 10% presenta un aumento del 66% comparado con el valor medio, mientras que con un reemplazo del 30% presenta una disminución del 27,5 % en la medición del amortiguamiento, representado en el factor de pérdida [40].

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede inferir que el efecto causado sobre las variables dinámicas por la adición de PUR no presenta un patrón claro, ya que hasta la adición del 10% sus propiedades mejoran, mientras que para un 30% indica una disminución, para posteriormente volver a incrementar con la sustitución del 60%. Los autores no exponen una explicación concreta a este comportamiento ocasionado por adición de PUR, ya que expresan que “Para comprender mejor los impactos y el comportamiento de estos desechos en la respuesta modal de los morteros reforzados, se necesitan más análisis y pruebas” [40].

Por otro lado, también se analizan propiedades mecánicas como la resistencia a la flexión, compresión y la adherencia a la matriz, todo basado en las normas EN 1015-11 [41].

Por ejemplo, para la resistencia a la compresión de los morteros se evidencia una disminución a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo por arena. Sin embargo, en algunos estudios, donde se reemplazó directamente el cemento por PUR, se reportan valores de 10 MPa con un reemplazo del 40%, mientras que la muestra sin PUR alcanzó valores hasta de 30 MPa. Dicho comportamiento lo atribuyen los autores a la disminución del gel de C-S-H, el cual se forma mediante la reacción de hidratación generada entre el agua y el cemento. Dicho gel es el principal aglutinante de la pasta de cemento endurecida y contribuye principalmente al buen comportamiento mecánico de los morteros [42].

Resultados similares se obtuvieron en otras investigaciones, donde se realizaron otro tipo de mezclas. Por ejemplo, algunos autores evaluaron el comportamiento de morteros fabricados con dos aglutinantes, donde identificaron disminución de la resistencia a la compresión del 20% para una adición del 20% de PUR, así como una disminución del 55% para una adición del 100% de PUR [43]. Mientras que otros autores que realizaron reemplazos de arena por PUR identificaron que a medida que se aumenta el agregado de poliuretano, las propiedades mecánicas también disminuyeron desde un 32.6%, para un reemplazo del 25% de arena por PUR, hasta un 63.6%, para un reemplazo del 100% de arena por PUR [44].

Por otro lado, otros autores realizaron reemplazo de arena por PUR y presentaron resultados similares. Por ejemplo, se registró una disminución del 60% para la resistencia a la compresión en morteros con reemplazo del 100%, así como también una disminución del 55% para la resistencia a la flexión para el mismo reemplazo [45]. No obstante, es importante resaltar que, con respecto al comportamiento a la deformación, todos los morteros demostraron que al someterlos a una carga progresiva a velocidad constante desarrollan propiedades de plasticidad y deformabilidad sostenibles, además de presentar una pequeña recuperación dimensional cuando se retira la carga. Este análisis permite darle un uso potencial a los morteros en estructuras que requieran absorción de pequeños impactos [45].

Un comportamiento similar fue observado para la resistencia a la flexión, de la cual se tienen registros que van desde 5.4 MPa para un reemplazo del 50% de arena hasta de 2.5 MPa para un reemplazo del 100%; mientras que la muestra sin adición de residuo oscilaba entre 5.3 MPa [46] y 8.48 MPa [43], según el estudio abarcado.

Analizando la relación entre porcentaje de adición de PUR y los resultados obtenidos para la resistencia a compresión y flexión, se debe resaltar que según algunos autores a porcentajes de reemplazo iguales o menores al 5% esta propiedad mecánica presenta aumentos de alrededor del 12.4%. Por ejemplo, la resistencia a la compresión aumentó a 12.4 MPa con adición de un 5% en peso de PUR, pero disminuyó a un 10.34 MPa con adición de 15% en peso de PUR. El módulo de elasticidad presenta un comportamiento similar al módulo de compresión, debido a que, en la adición del 5% en peso de PUR se evidencia un valor de 10.94 MPa, mientras que, en la adición del 15% este valor disminuye a 10.34 MPa [47].

Entre las demás propiedades medidas se encuentra también una muy importante en el proceso de producción de morteros, la cual es la permeabilidad. Para dicha propiedad los autores reportan que esta paso de tener un valor igual a $5.00E-12$ kg/m.s.Pa para la muestra sin

agregado, a aumentar hasta $1.10E-11$ kg/m.s.Pa para un reemplazo del 75% de arena por PUR [45].

Los autores expuestos concuerdan en que la disminución de las propiedades mecánicas, como el aumento de la permeabilidad, se debe a la naturaleza porosa de la PUR [43], ya que al ser un material compresible tiene una alta porosidad; lo que significa una mayor absorción de agua, así como una menor demanda de cemento. Esto finalmente con el tiempo, se ve reflejado en una disminución de propiedades mecánicas de resistencia a la flexión y a la compresión, así como aumento de la permeabilidad [45].

Por otro lado, otros autores se enfocaron en la comparación entre las matrices con PUR y dos tipos de cemento tradicionales de referencia, con base en la deformación presentada por ensayos de fatiga. Se determinó que los morteros con la espuma se adaptan mejor a la deformación y tienen resultados similares a los de referencia únicamente con incorporaciones entre 50-60% en la matriz, ya que a valores mayores su rendimiento baja. Adicionalmente se comprobó que hasta 525000 ciclos de carga y descarga los morteros de referencia y los experimentales se comportan de una manera similar [48].

Continuando con la adición de PUR en diversas matrices para la elaboración de materiales compuestos, algunos autores han analizado la adición de este material a matrices de yeso, donde determinaron que con una relación volumétrica de 1 parte de yeso por 1,5 partes de PUR, se puede obtener una adecuada resistencia mecánica a la compresión superior a 2 MPa, una reducción de la conductividad térmica del 33% y una reducción del peso del material en un 31% [49].

Otro punto de investigación que se ha evaluado es la mezcla del polvillo de PUR en matrices híbridas de espumas de poliuretano (PUF). Para esta investigación, una adición entre el 0% y 20% se vio reflejada inmediatamente en el proceso de expansión de las espumas híbridas, observar Figura 4.



Figura 4. Espumas híbridas sintetizadas con polvo de PUR como agregado. Fuente: [50].

Con respecto a la evolución de las espumas en sus propiedades mecánicas según la adición de PUR, se obtuvo que hasta un 10% de adición, las propiedades de compresión y la estructura celular no se vieron comprometidas. Sin embargo, a sustituciones del 15% dichas propiedades empezaron a verse modificadas; estos resultados son similares a los otros estudios revisados [50]. Este comportamiento, se puede explicar debido a que el mecanismo de fortalecimiento se centra en las reacciones en la zona interfacial entre la matriz y las partículas de PUR debido a la presencia del grupo isocianato (NCO) [51].

3.4. Tratamiento térmico

Los tratamientos térmicos son otra de las líneas de aprovechamiento que se han abarcado para la disposición de residuos PUR, los cuales permiten la conversión del material en monómeros valiosos (pirólisis) o gas de síntesis (gasificación) [4].

Lo más importante a tener en cuenta con respecto a los tratamientos térmicos es la temperatura a la cual los diferentes enlaces químicos se rompen, ya que esto se ve directamente reflejado con la liberación de gases en el proceso y la afectación a la estructura de la espuma [4]. En este orden de ideas, los autores reportan diferentes compuestos liberados con base en las temperaturas aplicadas.

En primera instancia en la [Figura 5](#) se presenta el análisis realizado por los autores de la pérdida de masa mediante

ensayos de Termogravimetría (TG) y Termogravimetría Diferencial (DTG); donde se identifican los picos de pérdida masa y los correspondientes a la ruptura de un enlace en específico.

Para el ensayo TG-DTG presentado en la [Figura 5](#), los autores mencionan una degradación debido al aumento de temperatura en una atmósfera de oxígeno, siendo la predominante en un rango de 236-411°C, donde se presentó según los autores una pérdida de masa de 60.70% cuando la temperatura llegó a 411°C, con una pequeña pérdida de 2.87% de masa una vez se alcanzó una temperatura de 162°C [52]. Adicionalmente, mediante ensayos de Infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR), determinaron que a los rangos de temperaturas observados predominan enlaces con estiramiento asimétrico C–O–C, enlaces -CH₃ y enlaces con estiramiento asimétrico -CH₂ [52].

Por otro lado, algunos autores identificaron que la degradación de la espuma por tratamiento térmico de pirólisis tiene dos hombros o picos, uno para la temperatura 250-300 °C que corresponde al excedente de isocianato y el segundo en 450-500 °C a la parte suave de la espuma rígida de poliuretano, siendo los gases producidos en esta volatilización los correspondientes a aromáticos, éster, éter y alcoholes volátiles, además poca cantidad de isocianatos que seguirán deshidratándose en derivados de la anilina [53]. Es importante aclarar que este comportamiento de degradación de zonas rígidas y suaves se presenta en procesos de pirólisis en ambiente de nitrógeno [53].

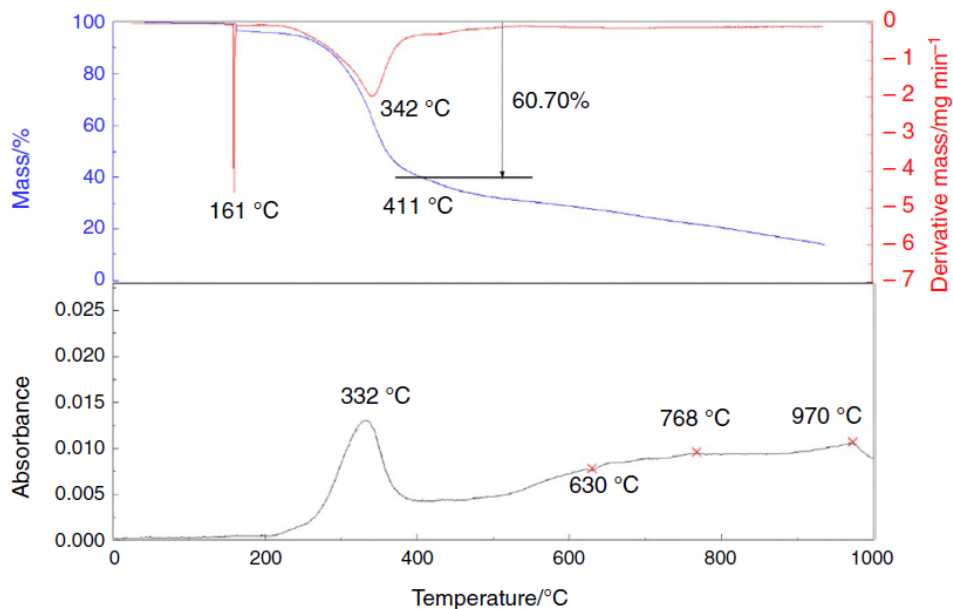


Figura 5. Perfil de calentamiento para ensayos TG y DTG bajo una atmósfera de oxígeno. Fuente: [52].

Desde otro punto de vista, se tienen autores que presentan franjas más limitadas en cuanto a la temperatura donde se da la pérdida de masa principal, las cuales oscilan entre 300°C a 400°C [54] o entre 338 °C y 348°C [55]. Presentando además que los primeros enlaces en romperse corresponden a los de uretano, los cuales se descomponen en isocianato y polioles (primeros 200°C aproximadamente) [56].

Analizando el comportamiento a temperaturas superiores a 600 °C, algunos autores han observado un aumento del craqueo en gases ligeros como CH₄, olefinas ligeras y CO. Adicional a esto, se habla de un aumento continuo en el rendimiento de compuestos aromáticos libres de heteroátomos con la temperatura, pero incluso a 800 °C, la recuperación de benceno y tolueno fue relativamente baja con ~0,7% en peso [57].

Algunos autores utilizan la técnica de pirólisis como método para obtener un producto volátil de alto valor, como el N₂. En este orden de ideas, se adaptan las condiciones de la pirólisis mediante el control de la temperatura, tamaño de partícula, un catalizador específico y flujo de gas de Argón, donde se busca que disminuya al máximo la producción de NH₃ o HCN (contaminantes críticos ambientales) y N-tar [58]. De este modo, los autores consiguieron obtener una mayor cantidad de N₂ en comparación con los compuestos secundarios.

Con respecto a demás tratamientos térmicos que han sido evaluados para el aprovechamiento de PUR, la gasificación representa una oportunidad para la obtención de gas rico en hidrógeno, una alternativa de combustible, ya que teniendo en cuenta que los compuestos volátiles de PUR han obtenido valores de 83,9%, el contenido de C de 66,3%, el alto contenido de C y volátiles indica que PUR es inflamable y tiene un alto poder calorífico [59].

Mediante la manipulación de la temperatura hasta 800°C, caudal de gasificación de 1.0 kg/h y NiO al 15% en peso durante el proceso, la fracción volumétrica de hidrógeno en el producto gaseoso podía alcanzar el 84,37% [59], valor superior a la primera publicación que los autores hicieron al respecto donde se obtuvo una fracción volumétrica de 79.85% [60].

Teniendo en cuenta que ambos procesos permiten la recuperación de compuestos volátiles de interés, algunos autores realizaron una comparación entre los dos procesos, gasificación y pirólisis, en orden de analizar la migración de nitrógeno dentro de los demás productos. Dichos autores, determinaron que el rendimiento en el proceso de gasificación alcanza hasta una producción del

67.1% dentro de los productos finales, mientras que para la pirólisis alcanza un valor de 55.3% [61].

Los resultados presentados en el párrafo anterior también deben atribuirse debido al uso de los catalizadores basados en compuestos metálicos. Caso similar a otro estudio de gasificación realizado con hidróxido de sodio cuyas condiciones óptimas fueron una temperatura de 1100°C, caudal de gasificación de 120 L/h y dosis del catalizador de 12.5% de la materia prima [62].

Continuando con la recuperación de compuestos de interés, se tienen otros métodos para determinar con más precisión las variables que favorecen la producción de éstos durante un proceso de gasificación o pirólisis. Una de estas herramientas es el análisis de varianza, la cual permite proyectar el efecto de variables independientes y conjuntas sobre una respuesta. Por ejemplo, se tiene la recuperación de gas rico en hidrógeno visto en párrafos anteriores, cuyos autores encontraron ciertas variables que favorecen la misma, de igual forma mediante esta herramienta se determinó igualmente que el contenido de humedad y la relación de aire y vapor en los procesos de gasificación, son los parámetros más importantes sobre el rendimiento del proceso [63].

A partir de la información expuesta, se puede analizar lo siguiente: el tratamiento térmico es una opción ideal para descomponer la espuma de PUR en sus componentes básicos, como el carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno; sin embargo, llevar a cabo este proceso requiere un gran consumo energético, como también la generación de gases tóxicos para la salud humana y el medio ambiente. Por otra parte, el tratamiento químico es efectivo para descomponer los compuestos en la espuma que pueden ser utilizados como materia prima para la fabricación de espumas recicladas de PUR, pero llevar a cabo este proceso hace que se generen residuos peligrosos debido al uso de productos químicos. El tratamiento biológico es una opción más sostenible, ya que solo se emplean microorganismos para la degradación de la espuma; sin embargo, realizar este tratamiento requiere ciertas condiciones específicas, como temperatura, pH, humedad, entre otros; a su vez, este tratamiento requiere periodos de tiempo más largos a comparación de los dos tratamientos mencionados anteriormente. Por último, el tratamiento mecánico permite reducir el volumen de la espuma, facilitando su manipulación para ser usado como materia prima para otras investigaciones que traten de reciclar este residuo, no obstante, llevar a cabo este tratamiento puede generar material particulado que puede ser perjudicial para la salud de las personas y el medio ambiente.

4. Conclusiones

La PUR es un residuo al cual se le ha realizado gran variedad de estudios desde diferentes campos académicos de degradación biológica, reciclaje químico, térmico y mecánico. La aplicación del tratamiento depende del tipo de interés para utilizar el material, el tipo de subproductos obtenidos, así como los recursos con los que dispone el interesado.

Para llevar a cabo los procesos de degradación del PUR, es importante tener en cuenta las temperaturas y tiempos de exposición del residuo, debido a que influyen notablemente en las características fisicoquímicas de los productos finales, liberando compuestos que pueden ser perjudiciales para la salud y el medio ambiente.

Los resultados obtenidos en el tratamiento biológico logran evidenciar un pequeño desgaste en la estructura del residuo de PUR, gracias a las enzimas hidrolíticas producidas por hongos y bacterias, las cuales rompen los enlaces químicos de los polímeros.

El interés en aplicar este tipo de tratamiento puede basarse en que el funcionamiento del sistema se da de forma natural y es estable, una vez se cumplan con las condiciones necesarias. Además de que, al ser una degradación dada por microorganismo que consumen el material para su desarrollo propio, el control de efluentes peligrosos se ve reducido, si no es eliminado. Sin embargo, los autores citados mencionan una tasa de mortalidad alta de los microorganismos en periodos de tiempo cortos, lo que indica la necesidad de seguir explorando estos tratamientos con el fin de extender el ciclo de vida de los microorganismos, detectar nuevas especies o condiciones, que conlleven al aumento del nivel de degradación de la espuma.

El tratamiento químico juega un papel importante en el reciclaje de la espuma de PU, gracias a que es posible separar los compuestos que forman la espuma y reutilizarlos para producir PUR reciclado. El compuesto más extraído para la elaboración de la espuma es el poliol y la eficiencia de la reacción de degradación depende del uso de los diferentes tipos de solventes, catalizadores y temperaturas que se emplean en la misma. El interés en aplicar este aprovechamiento depende de la viabilidad en el contexto de la empresa, investigador o gobierno interesado, ya que la instrumentación necesaria para su implementación no es de fácil acceso.

Es importante tener en cuenta el origen de las PUR a la hora de reemplazarlas en cualquier matriz de cemento, ya que su composición influye directamente en la relación entre partículas que el material desarrolla con la matriz,

al igual que el tamaño de partícula, la cual obtuvo valores menores a 20 μm . Del mismo modo es importante determinar la metodología de curado adecuada, ya que los autores concuerdan en que los morteros geopoliméricos incrementan rápidamente su resistencia a la compresión entre los primeros días de curado al aire libre, mientras que entre los 14 y 28 días de curado el incremento de resistencia es más leve. El interés en aplicar este tipo de aprovechamientos se basa en la facilidad de su metodología, ya que la transformación del material se basa en el molido y tamizado únicamente. Por otro lado, los controles de contaminantes liberados en su tratamiento son nulos, ya que no se transforma el estado químico del material, diferente al tratamiento térmico que libera gases tóxicos en el proceso.

El análisis de los diferentes tratamientos térmicos para el aprovechamiento de PUR resalta la gasificación como una metodología ideal para extraer gases ricos en hidrógeno, el cual puede ser empleado como combustible, mientras que, en la pirólisis se extraen compuestos volátiles de alto valor como el N_2 , sometiendo el residuo a temperaturas elevadas durante cortos periodos de tiempo. La importancia de este tipo de tratamiento se basa en que estas alternativas abren una oportunidad de aprovechamiento energético más sostenible, tratándose de aprovechar un material residual de muchos procesos industriales, y que además aportan a la economía circular. Sin embargo, la emisión de contaminantes como NH_3 o HCN representan un riesgo latente que debe analizarse más a fondo para la seguridad medio ambiental de nuestra sociedad.

Financiación

Este artículo fue desarrollado por el grupo de investigación Materiales y Medioambiente - GIMMA de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira. Quienes agradecen el apoyo brindado por la Universidad Nacional de Colombia, a través de la financiación a proyectos de investigación.

Contribución de los autores

I. López-Rodríguez: Preparación de datos, Análisis formal, Investigación, Redacción – borrador original. F. J. A. Díaz-Saavedra: Preparación de datos, Análisis formal, Investigación, Redacción – revisión y edición. J. Torres-Agredo: Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Redacción – borrador original, Visualización.

Todos los autores han leído y están de acuerdo con la versión publicada del artículo.

Conflicto de interés

Declaramos que no existe ningún conflicto de intereses en relación con este artículo. Los autores no tienen intereses financieros, personales, ni profesionales que puedan influir en los resultados o en la interpretación de los hallazgos encontrados.

Declaración de la Junta de Revisión Institucional

No aplica.

Declaración de consentimiento informado

No aplica.

Referencias

- [1] K. Skleničková, S. Abbrent, M. Halecký, V. Kočí, y H. Beneš, “Biodegradability and ecotoxicity of polyurethane foams: A review”, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 52, n.o 2, pp. 157-202, 2022, doi: <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1818496>
- [2] A. Magnin, L. Entzmann, E. Pollet, L. Avérous, “Breakthrough in polyurethane bio-recycling: An efficient laccase-mediated system for the degradation of different types of polyurethanes”, *Waste Management*, vol. 132, pp. 23-30, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.07.011>
- [3] K. M. Zia, H. N. Bhatti, y I. Ahmad Bhatti, “Methods for polyurethane and polyurethane composites, recycling and recovery: A review”, *Reactive and Functional Polymers*, vol. 67, n.o 8, pp. 675-692, ago. 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2007.05.004>
- [4] Y. Deng, R. Dewil, L. Appels, R. Ansart, J. Baeyens, y Q. Kang, “Reviewing the thermo-chemical recycling of waste polyurethane foam”, *Journal of Environmental Management*, vol. 278, p. 111527, ene. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111527>
- [5] J. Datta y P. Koczyńska, “From polymer waste to potential main industrial products: Actual state of recycling and recovering”, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 46, n.o 10, pp. 905-946, 2016, doi: <https://doi.org/10.1080/10643389.2016.1180227>
- [6] J. P. da Costa, A. Avellan, C. Mouneyrac, A. Duarte, y T. Rocha-Santos, “Plastic additives and microplastics as emerging contaminants: Mechanisms and analytical assessment”, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, vol. 158, p. 116898, ene. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2022.116898>
- [7] N. Gama, A. Ferreira, y A. Barros-Timmons, “Polyurethane Foams: Past, Present, and Future”, *Materials*, vol. 11, no. 10, p. 1841, 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/ma11101841>
- [8] J. E. Báez, “El crecimiento en los extremos: reactividad de grupos terminales en polímeros para la síntesis de copolímeros bloque”, *Educación Química*, vol. 27, n.o 2, pp. 97-104, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eq.2015.11.001>
- [9] T. Tiso *et al.*, “The metabolic potential of plastics as biotechnological carbon sources – Review and targets for the future”, *Metabolic Engineering*, vol. 71, pp. 77-98, may 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2021.12.006>
- [10] J. Liu *et al.*, “Biodegradation and up-cycling of polyurethanes: Progress, challenges, and prospects”, *Biotechnology Advances*, vol. 48, p. 107730, may 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2021.107730>
- [11] J.-H. Kim, S. H. Choi, M. G. Park, D. H. Park, K.-H. Son, y H.-Y. Park, “Biodegradation of polyurethane by Japanese carpenter bee gut-associated symbionts *Xanthomonas* sp. HY-71, and its potential application on bioconversion”, *Environmental Technology & Innovation*, vol. 28, p. 102822, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102822>
- [12] S. P. Singh, P. Sharma, A. Bano, A. K. Nadda, y S. Varjani, “Microbial communities in plastisphere and free-living microbes for microplastic degradation: A comprehensive review”, *Green Analytical Chemistry*, vol. 3, p. 100030, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.greeac.2022.100030>
- [13] A. Magnin, E. Pollet, V. Phalip, y L. Avérous, “Evaluation of biological degradation of polyurethanes”, *Biotechnology Advances*, vol. 39, p. 107457, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2019.107457>
- [14] R. Martens y K. H. Domsch, “Microbial degradation of polyurethane foams and isocyanate based polyureas in different media”, *Water Air Soil Pollut*, vol. 15, n.o 4, pp. 503-509, 1981, doi: <https://doi.org/10.1007/BF00279430>

- [15] M. S. Usha, M. K. Sanjay, S. M. Gaddad, y C. T. Shivannavar, “Degradation of h-acid by free and immobilized cells of *Alcaligenes latus*”, *Braz. J. Microbiol.*, vol. 41, n.º 4, pp. 931-945, 2010, doi: <https://doi.org/10.1590/S1517-83822010000400012>
- [16] L. Ren, Z. Tang, J. Du, L. Chen, y T. Qiang, “Recyclable polyurethane foam loaded with carboxymethyl chitosan for adsorption of methylene blue”, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 417, p. 126130, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126130>
- [17] A. Mazuelos, N. Iglesias-Gonzalez, C. Montes-Rosua, A. Romero-García, R. Romero, y F. Carranza, “Polyurethane foam as biomass support for removal of thiosalts from flotation process water”, *Minerals Engineering*, vol. 169, p. 106940, ago. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106940>
- [18] W. A. Botello Suárez, J. C. Ortiz Varón, y S. A. Peña Perea, “Inmovilización microbiana en polímeros sintéticos para el tratamiento de aguas residuales”, *nova*, vol. 14, n.º 26, p. 93, 2016, doi: <https://doi.org/10.22490/24629448.1755>
- [19] I. Amundarain, R. Miguel-Fernández, A. Asueta, S. García-Fernández, y S. Arnaiz, “Synthesis of Rigid Polyurethane Foams Incorporating Polyols from Chemical Recycling of Post-Industrial Waste Polyurethane Foams”, *Polymers*, vol. 14, n.º 6, p. 1157, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/polym14061157>
- [20] L. Polo Fonseca *et al.*, “Reducing the carbon footprint of polyurethanes by chemical and biological depolymerization: Fact or fiction?”, *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, vol. 41, p. 100802, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2023.100802>
- [21] K. Zhang *et al.*, “Biodegradation of polyester polyurethane by the marine fungus *Cladosporium halotolerans* 6UPA1”, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 437, p. 129406, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129406>
- [22] C. R. Newman y D. Forciniti, “Modeling the Ultraviolet Photodegradation of Rigid Polyurethane Foams”, *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 40, n.º 15, pp. 3346-3352, 2001, doi: <https://doi.org/10.1021/ie0009738>
- [23] X. Gu, S. Lyu, y S. Liu, “Alcoholysis of Waste Polyurethane Rigid Foam and Its Modification with Lignin for Recovery”, *Journal of Renewable Materials*, vol. 9, n.º 11, pp. 1913-1926, 2021.
- [24] X. Wang, H. Chen, C. Chen, y H. Li, “Chemical degradation of thermoplastic polyurethane for recycling polyether polyol”, *Fibers Polym*, vol. 12, n.º 7, pp. 857-863, 2011, doi: <https://doi.org/10.1007/s12221-011-0857-y>
- [25] X. Gu, X. Wang, X. Guo, S. Liu, C. Lou, y Y. Liu, “Study on Efficient Degradation of Waste PU Foam”, *Polymers*, vol. 15, n.º 10, p. 2359, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/polym15102359>
- [26] T. Vanbergen, I. Verlent, J. De Geeter, B. Haelterman, L. Claes, y D. De Vos, “Recycling of Flexible Polyurethane Foam by Split-Phase Alcoholysis: Identification of Additives and Alcoholizing Agents to Reach Higher Efficiencies”, *ChemSusChem*, vol. 13, n.º 15, pp. 3835-3843, 2020, doi: <https://doi.org/10.1002/cssc.202000949>
- [27] T. Fukaya, H. Watando, S. Fujieda, S. Saya, C. M. Thai, y M. Yamamoto, “Reheating decomposition process as chemical recycling for rigid polyurethane foam”, *Polymer Degradation and Stability*, vol. 91, n.º 11, pp. 2549-2553, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2006.05.011>
- [28] P.-H. Lin, C.-H. Ko, F.-C. Chang, S.-H. Tu, y C.-J. Lin, “Oxidation behavior and decomposition kinetics of mixed-waste biomass material”, *BioRes*, vol. 18, n.º 1, pp. 778-791, 2022, doi: <https://doi.org/10.15376/biores.18.1.778-791>
- [29] M. M. Alavi Nikje y K. M. Tavassoli, “Chemical recycling of semi-rigid polyurethane foams by using an eco-friendly and green method”, *CCL*, vol. 1, n.º 4, pp. 175-180, abr. 2012, doi: <https://doi.org/10.5267/j.ccl.2012.7.002>
- [30] M. M. A. Nikje y M. Nikrah, “Chemical Recycling and Liquefaction of Rigid Polyurethane Foam Wastes through Microwave Assisted Glycolysis Process”, *Journal of Macromolecular Science, Part A*, vol. 44, n.º 6, pp. 613-617, abr. 2007, doi: <https://doi.org/10.1080/10601320701285003>
- [31] A. Aguado, L. Martínez, A. Moral, J. Feroso, y R. Irusta, “Chemical Recycling of Polyurethane Foam Waste Via Glycolysis”, *Chemical Engineering Transactions*, vol. 24, may 2011, doi: <https://doi.org/10.3303/CET1124179>

- [32] C. Molero, A. de Lucas, y J. F. Rodríguez, “Recovery of polyols from flexible polyurethane foam by “split-phase” glycolysis with new catalysts”, *Polymer Degradation and Stability*, vol. 91, n.º 4, pp. 894-901, abr. 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2005.06.023>
- [33] A. Sheel y D. Pant, “6 - Chemical Depolymerization of Polyurethane Foams via Glycolysis and Hydrolysis”, en *Recycling of Polyurethane Foams*, S. Thomas, A. V. Rane, K. Kanny, A. V.k., y M. G. Thomas, Eds., en *Plastics Design Library*, William Andrew Publishing, 2018, pp. 67-75, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-51133-9.00006-1>
- [34] P. Zahedifar, L. Pazdur, C. Vande Velde, y P. Billen, “Multistage Chemical Recycling of Polyurethanes and Dicarbamates: A Glycolysis–Hydrolysis Demonstration”, *Sustainability*, vol. 13, p. 3583, mar. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/su13063583>
- [35] T. Takamoto, H. Shirasaka, H. Uyama, y S. Kobayashi, “Lipase-Catalyzed Hydrolytic Degradation of Polyurethane in Organic Solvent”, *Chem. Lett.*, vol. 30, n.º 6, pp. 492-493, 2001, doi: <https://doi.org/10.1246/cl.2001.492>
- [36] S. Matsumura, Y. Soeda, y K. Toshima, “Perspectives for synthesis and production of polyurethanes and related polymers by enzymes directed toward green and sustainable chemistry”, *Appl Microbiol Biotechnol*, vol. 70, n.º 1, pp. 12-20, 2006, doi: <https://doi.org/10.1007/s00253-005-0269-2>
- [37] K. Kanaya y S. Takahashi, “Decomposition of polyurethane foams by alkanolamines”, *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 51, n.º 4, pp. 675-682, ene. 1994, doi: <https://doi.org/10.1002/app.1994.070510412>
- [38] N. Saikia y J. de Brito, “Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review”, *Construction and Building Materials*, vol. 34, pp. 385-401, sep. 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.066>
- [39] T. Tantisattayakul, P. Kanchanapiya, y P. Methacanon, “Comparative waste management options for rigid polyurethane foam waste in Thailand”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 196, pp. 1576-1586, sep. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.166>
- [40] L. Ramon Roque da Silva, F. Cirino Gaspar, P. Cesar Gonçalves, V. Claret dos Santos, M. de Lourdes Noronha Motta Melo, y G. Ferreira Gomes, “An experimental dynamic study of cement mortar with polyurethane residues and foundry sand”, *Engineering Structures*, vol. 274, p. 115107, ene. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115107>
- [41] R. Briones-Llorente, R. Barbosa, M. Almeida, E. A. Montero García, y Á. Rodríguez Saiz, “Ecological Design of New Efficient Energy-Performance Construction Materials with Rigid Polyurethane Foam Waste”, *Polymers*, vol. 12, n.º 5, p. 1048, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/polym12051048>
- [42] H. A. Abdel-Rahman, M. M. Younes, y M. M. Khattab, “Recycling of polyurethane foam waste in the production of lightweight cement pastes and its irradiated polymer impregnated composites”, *J Vinyl Addit Technol*, vol. 25, n.º 4, pp. 328-338, 2019, doi: <https://doi.org/10.1002/vnl.21698>
- [43] I. Santamaría Vicario, L. Alameda Cuenca-Romero, S. Gutiérrez González, V. Calderón Carpintero, y Á. Rodríguez Saiz, “Design and Characterization of Gypsum Mortars Dosed with Polyurethane Foam Waste PFW”, *Materials*, vol. 13, n.º 7, p. 1497, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/ma13071497>
- [44] C. Junco, J. Gadea, A. Rodríguez, S. Gutiérrez-González, y V. Calderón, “Durability of lightweight masonry mortars made with white recycled polyurethane foam”, *Cement and Concrete Composites*, vol. 34, n.º 10, pp. 1174-1179, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.07.006>
- [45] J. Gadea, A. Rodríguez, P. L. Campos, J. Garabito, y V. Calderón, “Lightweight mortar made with recycled polyurethane foam”, *Cement and Concrete Composites*, vol. 32, n.º 9, pp. 672-677, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.017>
- [46] L. A. Cuenca-Romero, R. Arroyo, Á. Alonso, S. Gutiérrez-González, y V. Calderón, “Characterization properties and fire behaviour of cement blocks with recycled polyurethane roof wastes”, *Journal of Building Engineering*, vol. 50, p. 104075, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104075>
- [47] C. Yang, Z.-H. Zhuang, y Z.-G. Yang, “Pulverized polyurethane foam particles reinforced rigid polyurethane foam and phenolic foam”, *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 131, n.º 1, 2014, doi: <https://doi.org/10.1002/app.39734>

- [48] C. Junco, A. Rodríguez, V. Calderón, C. Muñoz-Rupérez, y S. Gutiérrez-González, “Fatigue durability test of mortars incorporating polyurethane foam wastes”, *Construction and Building Materials*, vol. 190, pp. 373-381, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.161>
- [49] R. Gómez-Rojo, L. Alameda, Á. Rodríguez, V. Calderón, y S. Gutiérrez-González, “Characterization of Polyurethane Foam Waste for Reuse in Eco-Efficient Building Materials”, *Polymers*, vol. 11, n.º 2, p. 359, 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/polym11020359>
- [50] T. Calvo-Correas, L. Ugarte, I. Larraza, C. Peña-Rodríguez, M. A. Corcuera, y A. Eceiza, “Residues from rigid foams and graphene for the synthesis of hybrid polyurethane flexible foams composites”, *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 12, pp. 2128-2137, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.04.022>
- [51] L. Bergamonti, R. Taurino, L. Cattani, D. Ferretti, y F. Bondioli, “Lightweight hybrid organic-inorganic geopolymers obtained using polyurethane waste”, *Construction and Building Materials*, vol. 185, pp. 285-292, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.006>
- [52] Z. Yao *et al.*, “Probing the combustion and pyrolysis behaviors of polyurethane foam from waste refrigerators”, *J Therm Anal Calorim*, vol. 141, n.º 3, pp. 1137-1148, 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s10973-019-09086-8>
- [53] L. Jiang *et al.*, “Pyrolytic behavior of waste extruded polystyrene and rigid polyurethane by multi kinetics methods and Py-GC/MS”, *Fuel*, vol. 222, pp. 11-20, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.143>
- [54] L. Jiao, H. Xiao, Q. Wang, y J. Sun, “Thermal degradation characteristics of rigid polyurethane foam and the volatile products analysis with TG-FTIR-MS”, *Polymer Degradation and Stability*, vol. 98, n.º 12, pp. 2687-2696, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2013.09.032>
- [55] H. Stančin *et al.*, “Thermogravimetric and kinetic analysis of biomass and polyurethane foam mixtures Co-Pyrolysis”, *Energy*, vol. 237, p. 121592, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121592>
- [56] Z. Yao, S. Yu, W. Su, W. Wu, J. Tang, y W. Qi, “Comparative study on the pyrolysis kinetics of polyurethane foam from waste refrigerators”, *Waste Manag Res*, vol. 38, n.º 3, pp. 271-278, 2019, doi: <https://doi.org/10.1177/0734242X19877682>
- [57] A. Eschenbacher, R. J. Varghese, J. Weng, y K. M. Van Geem, “Fast pyrolysis of polyurethanes and polyisocyanurate with and without flame retardant: Compounds of interest for chemical recycling”, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 160, p. 105374, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105374>
- [58] X. Guo, L. Wang, L. Zhang, S. Li, y J. Hao, “Nitrogenous emissions from the catalytic pyrolysis of waste rigid polyurethane foam”, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 108, pp. 143-150, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.05.006>
- [59] X. Guo, N. Li, y T. Zhang, “Preparation of hydrogen-rich gas from waste polyurethane foam by steam gasification and catalytic reforming in a two-stage fixed bed reactor”, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s10163-021-01268-7>
- [60] X. Guo, Z. Song, y W. Zhang, “Production of hydrogen-rich gas from waste rigid polyurethane foam via catalytic steam gasification”, *Waste Manag Res*, vol. 38, n.º 7, pp. 802-811, 2020, doi: <https://doi.org/10.1177/0734242X19899710>
- [61] X. Guo, W. Zhang, L. Wang, y J. Hao, “Comparative study of nitrogen migration among the products from catalytic pyrolysis and gasification of waste rigid polyurethane foam”, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 120, pp. 144-153, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.04.018>
- [62] X. Guo, L. Wang, S. Li, X. Tang, y J. Hao, “Gasification of waste rigid polyurethane foam: optimizing operational conditions”, *J Mater Cycles Waste Manag*, vol. 17, n.º 3, pp. 560-565, 2015, doi: <https://doi.org/10.1007/s10163-014-0281-7>
- [63] R. Hasanzadeh, M. Mojaver, T. Azdast, y C. B. Park, “A novel systematic multi-objective optimization to achieve high-efficiency and low-emission waste polymeric foam gasification using response surface methodology and TOPSIS method”, *Chemical Engineering Journal*, vol. 430, p. 132958, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132958>