

EVALUACIÓN Y PUESTA A PUNTO DE SUPERFICIES OBTENIDAS MEDIANTE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA (FDM) CON RENDIMIENTO ÓPTIMO DE DESMOLDEO PARA LA FABRICACIÓN DE ESPUMA DE POLIURETANO (PUR)

J. Gómez¹, G. Guerrero¹, Ó. Rodríguez¹

¹Escuela Politécnica Superior de Córdoba, Campus Universitario de Rabanales, N-IV, km 396, 14014 Córdoba, p82gocaj@uco.es

Resumen: La espuma de poliuretano (PUR) es un material plástico presente en numerosos ámbitos de nuestra vida. Esta espuma tiene una gran adherencia al molde donde se fabrica, normalmente de aluminio, lo que obliga al uso de grandes cantidades de agentes desmoldeantes. Existen dos grandes grupos de agentes desmoldeantes, los que son de base disolvente y los más recientes, de base agua. Por otro lado, el modelado por deposición fundida (FDM) es el método de impresión 3D más utilizado y que tiene un gran número de ventajas frente al clásico mecanizado por CNC. El objetivo de este proyecto es estudiar qué combinación de material + agente desmoldeante presenta mejores resultados en términos de fuerza, presión, energía de despegue y cantidad de espuma adherida a la superficie tras varios ciclos de uso, con la finalidad de poder crear un molde mediante fabricación aditiva dedicado al prototipado rápido de espuma de poliuretano.

Palabras clave: espuma de poliuretano, desmoldeo de espuma, adherencia, agentes desmoldeantes, prototipado rápido.

1. INTRODUCCIÓN.

La espuma surge de la reacción exotérmica del polioliol y el isocianato empleados. Para la formación de la espuma, el isocianato y el polioliol mezclados adecuadamente son vertidos en un molde, habitualmente de aluminio; tras ello, la mezcla es atemperada en torno a 50-70 ° [1]. La espuma se adaptará a la forma que demande el molde en cuestión.

Debido a la adhesión de la espuma a las paredes del molde, se requiere una elevada fuerza de desmoldeo [2]. La solución más utilizada en la industria para hacer frente a la adhesión se basa en el uso de agentes desmoldeantes líquidos [3] con los que se impregnan las paredes del molde y evitan que el PUR se pegue. Hay principalmente dos tipos de agentes desmoldeantes, agentes de base disolvente y de base agua [1], siendo estos últimos mucho menos perjudiciales con el medio ambiente al carecer de compuestos orgánicos volátiles (COV).

2. OBJETIVOS.

El objetivo de este proyecto es estudiar qué combinación de materiales comunes en fabricación aditiva y desmoldeantes son menos reactivos con la espuma de poliuretano (PUR) y permiten una extracción de la espuma con menor fuerza, usando en las diferentes probetas la misma cantidad de líquido desmoldeante.

Las probetas utilizadas son obtenidas por fabricación aditiva y son de PETG, PLA y PLA 3D870 y los agentes desmoldeantes con los que se impregnarán serán uno de base disolvente, el GORAPUR LK 8910-7B (GORAPUR), y otro de base agua, el ECOLEASE 03 3580 J5W (ECOLEASE). Por tanto, los conjuntos estudiados serán: (i) PETG + ECOLEASE, (ii) PETG, GORAPUR, (iii) PLA+ECOLEASE, (iv) PLA + GORAPUR, (v) PLA 3D870 + ECOLEASE y (vi) PLA 3D870 + GORAPUR.

Se realizarán tres ciclos de espumado sobre cada combinación material + desmoldeante, aplicando el desmoldeante en la superficie de la probeta únicamente al principio.

La finalidad del estudio será comprobar qué material + desmoldeante ha necesitado menor fuerza de extracción, y por ello, cuál es más susceptible de que sea utilizado como molde dedicado a la fabricación de prototipos de espuma de poliuretano.

Para ello, se estudiarán las características superficiales de cada material empleado (ángulo de deslizamiento al agua y rugosidad), la fuerza, presión y energía de desmoldeo empleada, el porcentaje de superficie ocupado por espuma e imágenes 3D y 2D de las probetas, entre otras.

3. ESTADO DEL ARTE Y CONTEXTO CIENTÍFICO.

Mecanismos de adhesión.

Aún no existe una teoría única que explique un único mecanismo adhesión, por ahora se sabe que el fenómeno de la adhesión depende de las características superficiales de los materiales en cuestión. De momento, la comunidad científica ha logrado diferenciar distintos mecanismos basados en fenómenos mecánicos, de difusión, moleculares, o químicos [4].

La adhesión en la espuma de poliuretano.

Normalmente el polioliol y el isocianato son vertidos en un molde. Lo más frecuente en la industria, es que el molde empleado sea de aluminio, debido a su reducido coste y facilidad de manejo. Como contraprestación al uso de este material, se generan enlaces de uretano entre los grupos funcionales del isocianato -NCO, -NHCOO y los grupos de hidroxilos de la superficie de aluminio, provocando, por tanto, que segmentos del poliuretano se unan a la superficie del aluminio [5].

Para evitar este fenómeno y poder seguir empleando los moldes de aluminio, se recurre al uso de agentes desmoldeantes en forma líquida que son aplicados a la superficie del molde.

Prototipado rápido con impresión 3D.

La creación rápida de prototipos es una de las razones principales por las que se llevó a cabo este trabajo y la causa por la que se estudiará la interacción de la espuma de PUR con material polimérico cubierto con líquido desmoldeante.

Estudiar la fuerza de desmoldeo necesaria y el número de series que se podrán realizar con una misma probeta impresa en 3D, permitirá en un futuro la creación de moldes completos con la combinación más eficiente de desmoldeante y material polimérico.

Antes de que un nuevo producto salga a la venta pasa por varias modificaciones previas. La idea de crear un prototipo de cada una de estas modificaciones resulta interesante para poder observar en el mundo físico los cambios realizados. La creación de estas piezas primerizas suele ser compleja, especialmente si no se cuenta con los equipos clásicos de producción de prototipos, que por lo general suelen ser costosos.

Agentes desmoldeantes.

En la industria de la fabricación de espuma de poliuretano es prácticamente obligatorio el uso de agentes desmoldeantes para conseguir un correcto desmoldeo.

Los agentes desmoldeantes se suelen encontrar en forma de líquido o pasta y crean una capa límite entre la superficie del molde y la espuma [6].

Cuando se retira la pieza parte del líquido quedará dentro del molde y otra parte en la espuma, teniendo que aplicar de nuevo otra capa tras cada ciclo de moldeo.

Se están desarrollando agentes desmoldeantes de base acuosa que permitan sustituir a los clásicos de base disolvente. Estos desmoldeantes son de menor costo a causa de no tener componentes del petróleo y su principal ventaja es que están libres de compuestos orgánicos volátiles [7].

4. MATERIALES Y MÉTODOS.

Se ha fabricado un molde para realizar los ensayos que permite poner en contacto las probetas con desmoldeante con la espuma PUR.

Molde.

El molde tiene forma cilíndrica, y está abierto en un extremo, por donde se verterá la mezcla para formar la espuma de poliuretano. Está compuesto por un cilindro de aleación aluminio-cobre recubierta de PTFE o teflón, un contramolde de aluminio, donde irá colocada la probeta, y una tapadera de la misma aleación, también recubierta de teflón.

Filamentos de impresión 3D.

Los materiales empleados para imprimir las probetas fueron el PETG, PLA y PLA 3D870.

Diseño de la probeta.

Probetas circulares de 43 mm de diámetro con un sistema de clip entre la probeta y el soporte de aluminio con el que se realiza el ensayo de pull-off.

Fuerza de despegue.

El equipo para obtener la medida de la fuerza de despegue es un banco de ensayo de fuerza de desplazamiento vertical de precisión. El modelo es el MX2 500 N de la firma IMADA con un dinamómetro de 100 N fijado. El dinamómetro se conectó al software Force Recorder Profesional, desarrollado por IMADA, el cual era capaz de registrar la fuerza de despegue en función del desplazamiento del banco de ensayo, con ello se obtenía una gráfica de fuerza por desplazamiento.



Figura 1. Banco de ensayo IMADA MX2 500N.

5. RESULTADOS, DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.

Presión de despegue o pull-off.

En la Figura 2 se puede observar cómo en el primer pull-off, cuando el desmoldeante está recién aplicado sobre la superficie de la probeta, las presiones en los distintos materiales y desmoldeantes, presentan valores similares. Sin embargo, al realizar el segundo y tercer ciclo de espumado, se va perdiendo el desmoldeante que quedaba en la superficie y por ello la presión aumenta considerablemente. Este hecho destaca notoriamente en la combinación PETG + ECOLEASE, que llega a pasar de un valor de 2,05 kPa en el primer pull-off hasta 42,92 kPa en el tercero, cuando ya apenas queda desmoldeante en la superficie en contacto con la espuma.

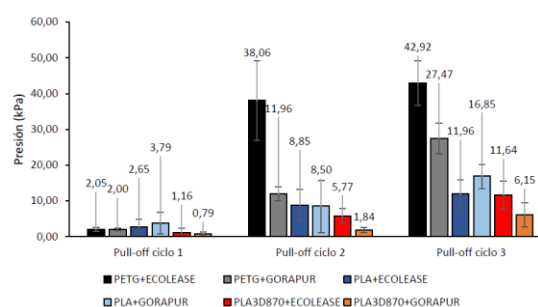


Figura 2. Evolución de la presión de despegue (kPa) en las diferentes combinaciones material-desmoldeante en los tres ciclos de espumado.

Tras comprobar los valores que se obtienen empleando desmoldeantes, es necesario mostrar cuales serían los resultados sin el uso de ellos (ver Figura 3).

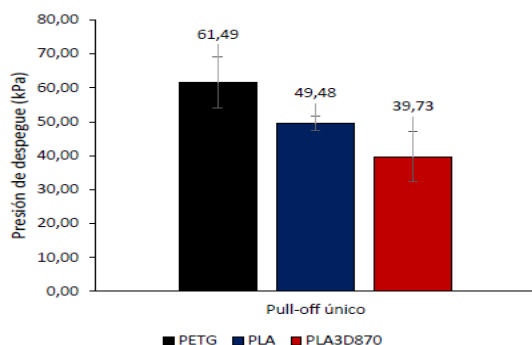


Figura 3. Valores de presión de despegue (kPa) en PETG, PLA y PLA 3D870 sin desmoldeante aplicado.

Es claramente notorio que el uso de los desmoldeantes afecta drásticamente a la presión de despegue necesaria, pasando de valores que rondan los 1 y 3 kPa hasta 62 kPa, 60 veces más de fuerza necesaria cuando no usamos desmoldeante para separar la probeta de la espuma adherida.

Energía de despegue.

Gracias a que el banco de ensayo se podía conectar al software Force Recorder Profesional, se pudo extraer automáticamente de cada ensayo una gráfica de Fuerza [N] vs. Desplazamiento [mm], de forma que el área encerrado bajo la curva representa el trabajo realizado por dicha fuerza.

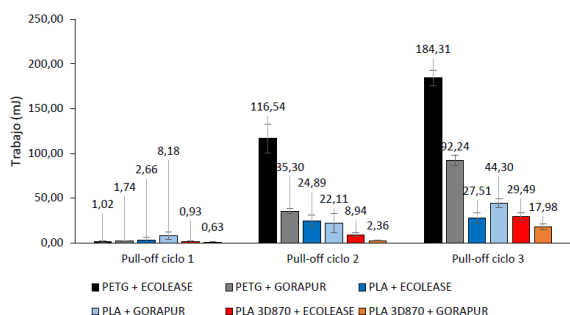


Figura 4. Evolución de la energía de despegue media (mJ) en las diferentes combinaciones material-desmoldeante a lo largo de los tres ciclos de espumado.

Analizando la Figura 4, los resultados son coherentes con los obtenidos en los gráficos de barras de presión de despegue (Figura 2), obteniendo mayores valores de trabajo, en aquellas combinaciones donde se requería más fuerza para extraer la probeta. Nuevamente, queda confirmado que, en cuanto a términos de energía o trabajo de despegue, el material con mejor comportamiento es el PLA 3D870 y más concretamente cuando se le aplica el desmoldeante GORAPUR LK 8910-7B, de base disolvente.

Porcentaje de espuma adherida.

Para confirmar que los valores de fuerza, presión y energía de despegue obtenidos eran coherentes con la

cantidad de espuma que quedaba atrapado en la probeta, se realizaron fotografías de las mismas y se analizaron.

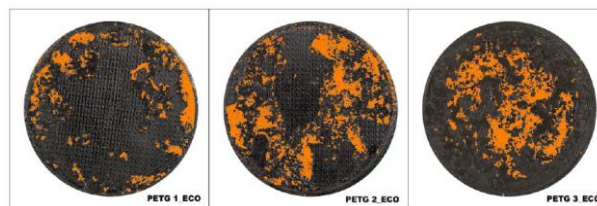


Figura 5. Ejemplo de espuma adherida sobre probeta de PETG con desmoldeante Ecolase.

En la Tabla 1 se resumen los resultados obtenidos tras el análisis de la cantidad de espuma adherida en la superficie de las probetas.

Tabla 1. Tabla resumen de los resultados de área de espuma retenida y % de espuma retenida final de todas las combinaciones material+desmoldeante

Material probeta	Tipo desmoldeante	Área sustrato (mm ²)	Valor medio área espuma retenida (mm ²)	Valor medio área porcentaje (%)	Desviación estándar
PETG	ECOLEASE	1432,0	178,9	12,5	3,7
PETG	GORAPUR	1432,0	126,5	8,8	5,7
PLA	ECOLEASE	1432,0	62,0	4,3	4,9
PLA	GORAPUR	1432,0	147,7	10,3	1,7
PLA 3D870	ECOLEASE	1432,0	28,1	2,0	2,6
PLA 3D870	GORAPUR	1432,0	17,7	1,2	1,0

Tras el análisis de los resultados de la cantidad de espuma adherida en todas las probetas ensayadas y el resumen general mostrado en la Tabla 1, se puede acreditar que el material y el desmoldeante que muestra una menor interacción con la espuma de poliuretano en lo respectivo a cantidad final de espuma presente en la superficie tras tres ciclos de desmoldeo es el PLA 3D870 + GORAPUR.

Rugosidad.

Los valores de rugosidad se midieron en las probetas vírgenes y tras tres pull-offs de las diferentes combinaciones material + desmoldeante, para observar si se producen cambios de rugosidad en el material tras estar en contacto con la reacción química que forma la espuma (Figura 6).

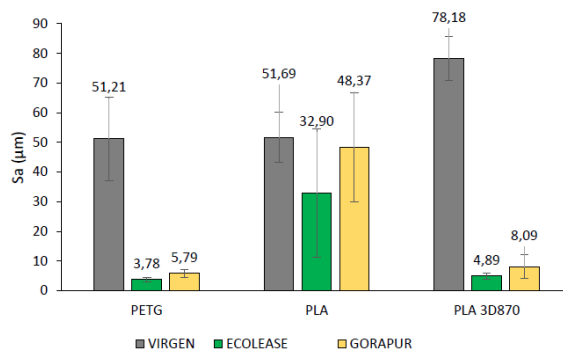


Figura 6. Valores de Sa en PETG, PLA y GORAPUR con las probetas vírgenes y tras tres pull-offs con ECOLEASE y GORAPUR

Lo que se puede destacar de estas gráficas es el descenso claro en los valores de Sa, tras los tres ciclos de espumado. Se produce tanto en Sa, y en los tres materiales empleados. Una posible explicación a este acontecimiento puede ser que la reacción entre el polioliol y el diisocianato genere un ataque químico al material impreso en 3D “alisándolo”

6. CASO DE APLICACIÓN PRÁCTICA: DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN COJÍN DE ASIENTO.

No podemos olvidar que este trabajo se ha llevado a cabo con la intención de comprobar que material y desmoldeante son los más útiles a la hora de crear un molde destinado al prototipado rápido de objetos de espuma de poliuretano. Como la espuma de poliuretano es ampliamente usada en la industria del automóvil, se ha visto conveniente fabricar un molde de cojín de asiento (motocicleta o coche) y ha sido impreso con el material que presenta el mejor comportamiento, el PLA 3D870 (Figura 7).

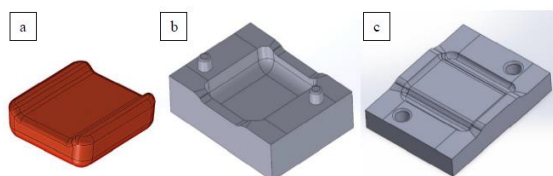


Figura 7. Prototipo de cojín (a), base molde cojín (b), tapa molde cojín (c).

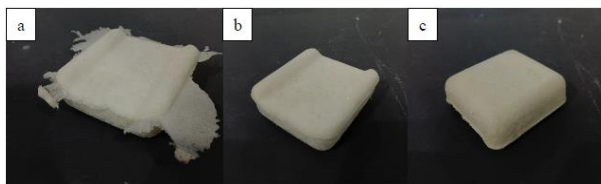


Figura 8. Pieza de espuma de poliuretano obtenida usando el desmoldeante GORAPUR y desmoldeante genérico grasiento. Pieza con rebabas (a), vista superior (b), vista inferior (c).

Las ventajas que presenta el prototipado rápido con la impresión 3D se muestra claramente en el ejemplo realizado.

- Teniendo en cuenta el coste del material PLA 3D870, el molde que nosotros hemos empleado cuesta fabricarlo 3,05 € y apenas pesa 160 g. Fabricar el mismo molde de aluminio nos costaría 8 € de material y pesaría 2 kg.
- El precio de la impresora empleada, una Ender 3 V2, cuesta alrededor de los 200€. Un centro de fresado CNC, decenas de miles de euros.
- Para manejar el centro de fresado es necesario contar con un operario cualificado y que se encuentre presente durante el proceso de fabricación. Para la impresión 3D únicamente son necesarias unas nociones básicas de diseño y no es necesario estar presente mientras funciona la impresora.
- Con el molde de aluminio se desperdicia una gran cantidad de material (viruta), mientras que con la fabricación aditiva no se generan desperdicios.

7. CONCLUSIONES.

- 1.- Los materiales de impresión 3D, impregnados con los agentes desmoldeantes empleados, son eficientes para el desmoldeo de espuma PUR.
- 2.- Observando los valores de fuerza de desmoldeo y cantidad de espuma adherida a la superficie de las probetas, queda evidenciado que los materiales poliméricos empleados (PETG, PLA y PLA 3D870) no pueden ser utilizados para el desmoldeo de espuma PUR sin que estén recubiertos de líquido desmoldeante.
- 3.- La fuerza, presión y energía de despegue aumenta a lo largo de los ciclos de espumado, siendo menor cuando el desmoldeante está recién rociado sobre la superficie de la probeta y aumentando conforme se somete a la probeta más pull-offs.
- 4.- La combinación de PLA 3D870 + GORAPUR muestra el mejor comportamiento en el desmoldeo de espuma de poliuretano, ya que con ella se obtienen los valores más bajos de fuerza, presión y energía de despegue y cantidad de espuma adherida.

8. REFERENCIAS.

- [1] A. Olietta, E. Pargoletti y G. Cappelletti, «A novel optimized mold release oil-in-water emulsion for polyurethane foams production,» *Journal of Molecular Liquids*, pp. 199-207, 2018.
- [2] P. Zentay, Z. Zoller, G. Arz y L. Vas, «Model for the calculation of demoulding force for polyurethane parts,» *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, vol. 43, nº 2, 1999.
- [3] K. Ashida, *Polyurethane and Related Foams*, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2006.
- [4] F. Awaja, M. Gilbert, G. Kelly, B. Fox y P. J. Pigram, «Adhesion of polymers,» *Progress in Polymer Science*, vol. 34, nº 9, pp. 948-968, 2009.
- [5] K. Jangsoon, C. Jaedong y L. Yun-Soo, «Bonding of urethane reactants to aluminum surface,» *Journal of materials science*, vol. 40 (11), pp. 2789-2794, 2005.
- [6] C. E. Majewski, «Investigation and modelling of release behaviour of polymer moulds for polyurethane foam moulding,» *Loughborough University*, 2007.
- [7] M. Rigby, «Water-based SPMRAs: Improved productivity, quality and environmentally safe,» *Rubber World*, 2000.
- [8] V. E. Basin, «Progress in Organic Coatings,» *II-Union Scientific Research and Development Institute for Electrical Insulation*, vol. 12 (3), pp. 213-250, 1984.
- [9] M. Madrid, «Tecnología de la adhesión,» 2002.
- [10] Hubs, «Hubs,» 2020. [En línea]. Available: <http://www.hubs.com>.
- [11] C. Silbernagel, «Additive Manufacturing 101-4: What is material jetting?,» 2018. [En línea]. Available: <http://canadamakes.ca/what-is-material-jetting/>.
- [12] W. Shaw, «W.N. Shaw,» 2017. [En línea]. Available: https://wnshaw-com.translate.google.com/water-base-versus-solvent-base/?_x_tr_sl=auto&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=op,wapp.