

ESTUDIO DE LA ADHESIÓN EN UNIONES DE POLÍMEROS OBTENIDAS MEDIANTE SOBREINYECCIÓN PARA APLICACIONES BIOMÉDICAS

Everling A. Dávila^a, María V. Candal^b, Miguel Sánchez-soto^c

^a *Instituto Nacional de Bioingeniería, Universidad Central de Venezuela, Los Chaguaramos
1041, Caracas, Venezuela, everling.davila@inabio.edu.ve, <http://www.inabio.edu.ve>*

^b *Universidad Simón Bolívar, Departamento de Mecánica, Sección de Polímeros, Apartado
89000, Caracas 1080-A, Venezuela. davila.everling@gmail.com, mcandal@usb.ve*

^c *Centre Català del Plàstic, Universitat Politècnica de Catalunya, c/ Colom 114, 08222-
Terrassa, Barcelona, España. m.sanchez-soto@upc.edu*

Palabras Clave: Propiedades mecánicas, adhesión, polímeros, tracción, sobreinyección.

Resumen: El objetivo de esta investigación radica en el estudio de la adhesión entre materiales poliméricos rígidos mediante la técnica de la sobreinyección. Específicamente, se estudió el efecto de las variables del proceso de sobreinyección de los pares estudiados que podrían afectar la adhesión entre ellos, formando una estructura del tipo rígido-rígido (hard-hard). Se propone este tipo de unión para la fabricación de piezas en el sector de la medicina. Se emplearon como polímeros de estudio: acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) y poli-metil-metacrilato (PMMA). Mediante este sistema de pares de materiales se evaluó el efecto de las condiciones de proceso (Presión sostenida (P_s), Velocidad de inyección (v_i) y Temperatura de inyección (T_i)) en la resistencia adhesiva. El sistema fue evaluado mediante ensayos mecánicos de tracción, obteniendo una mayor resistencia adhesiva al incrementar las condiciones de inyección.

1 INTRODUCCION

En la actualidad, el moldeo de materiales plásticos ha abarcado una amplia gama de aplicaciones y ha sustituido muchas otras que anteriormente pertenecían a otros materiales, tales como la madera y el metal; razón por la cual su estudio ha alcanzado mayor interés tanto a nivel científico, como industrial. En el mundo del procesamiento, especialmente en el moldeo por inyección, se busca mejorar y avanzar tecnológicamente con la finalidad de cumplir con las exigencias del mercado, el cual demanda procesos más eficientes, de ciclos más cortos, de mayor productividad y a los menores costos.

El proceso de sobreinyección hace referencia a una nueva técnica de moldeo por inyección que busca la unión de dos o más materiales diferentes de manera secuencial o simultánea, produciendo así piezas terminadas sin necesidad de realizar ensamblajes posteriores, modificando y/o mejorando sus propiedades finales. Por tanto, el proceso consiste en inyectar un primer material (sustrato) que servirá de inserto en el molde para la inyección de un segundo material (sobreinyectado), formando una pieza que combinará las propiedades de ambos materiales.

La aplicación de la técnica de sobreinyección es cada vez más amplia en el desarrollo de productos, lo que demanda un mayor conocimiento acerca de la aplicabilidad de la misma, así como, de las ventajas que esta técnica ofrece. De esta manera, ante la alta demanda de procesos cada vez más eficientes y las elevadas probabilidades de expansión de la técnica de sobreinyección a nivel mundial, la presente investigación pretende estudiar los mecanismos de adhesión que actúan entre las superficies sobreinyectadas de materiales con uniones de estructuras rígido-rígido.

Para ello, se emplearon materiales como el PMMA sobreinyectado en ABS, pares de materiales con algunas ventajas que permitirían su empleo en aplicaciones médicas con propiedades mecánicas adecuadas para el desarrollo de dispositivos y prótesis externas. El PMMA es un material que aunque tiene muchas atribuciones como buena resistencia al impacto, a la intemperie y transparencia, tiene dos desventajas importantes; se raya fácilmente con cualquier objeto metálico y es de muy fácil combustión, por lo que no se apaga al ser retirado del fuego. El ABS es un material resistente a compuestos químicos y con buena resistencia al impacto, pero sus principales desventajas radican en que su resistencia ambiental no es muy buena y su costo es mayor que las poliolefinas convencionales, además de que son materiales inflamables, no autoextinguibles (Brydson, 1999), (Osswald et al, 2006).

Razón por la cual, este estudio es de gran interés e innovación ya que, no se ha encontrado ningún tipo de información relativa a este tipo de uniones desarrolladas en este estudio. En el área de bioingeniería, actualmente se emplea el PMMA para aplicaciones médicas como implantes para dientes, uniones con dientes y lentes de contacto; mientras que del ABS se encontró información relativa para aplicaciones médicas.

2 BASES TEÓRICAS

2.1 Sobreinyección

Entre las nuevas técnicas de inyección desarrolladas, recientemente, se encuentra la sobreinyección, la cual consiste en un moldeo de inyección donde un material 1 es inyectado sobre o al lado de un material 2. Si son debidamente inyectados o poseen cierta compatibilidad, estos materiales formarán enlaces fuertes en su unión evitando el uso de adhesivos (Avery, 1998). Este proceso se divide en dos tipos, la inyección sobre insertos y la inyección multi-materiales o multicolores.

La inyección sobre insertos es el proceso más usado, el cual consiste en inyectar material sobre un inserto previamente colocado en el molde. La ventaja de este tipo de sobreinyección está primordialmente en que es posible emplear las máquinas convencionales de inyección, evitando así un incremento en el costo de manufactura.

Por otro lado, la inyección de multi-materiales, usada en este estudio, requiere el uso de un equipo especial, puesto que consiste en inyectar dos o más materiales en el mismo molde durante el mismo ciclo de moldeo. Obteniéndose piezas con mayor calidad, reduciendo el tiempo de ciclo de moldeo, combinando colores y texturas, pero con la desventaja del incremento del costo en maquinaria (Avery, 1998). Esta técnica proporciona así, la ventaja de obtener una pieza ensamblada en una sola etapa de operación, evitando llevar a cabo procesos adicionales de ensamblaje.

2.2 Mecanismos de adhesión

La adhesión es medida como la unión producida entre los enlaces de dos o más materiales, y es cuantificada a través de carga, esfuerzo, energía o trabajo requerido para romper dicha unión interfacial. Cuando se hace referencia a los mecanismos de adhesión producidos en la unión de estos materiales se observa que existen diversos tipos o modelos, como por ejemplo: adhesión mecánica, adhesión eléctrica, por difusión, por adsorción termodinámica, por uniones químicas y por cohesión, entre otros (Martínez, 1998).

En general, el nivel de adhesión alcanzada será función de la combinación de los materiales, puesto que ello dependerá de la similitud que exista en la estructura química de ambos y de sus parámetros de solubilidad (δ). Sin embargo, hay que tener presente que esta aproximación no asegura una buena adhesividad, puesto que ello siempre dependerá de los parámetros de proceso usados en cada etapa del proceso (Martínez, 1998; Young y Lowell, 1991). La adherencia o afinidad química entre polímeros al aplicar la técnica de sobreinyección es imprescindible, por lo que es necesario conocer la compatibilidad de los materiales para la sobreinyección efectiva de los mismos.

2.2.1. Modelo de la difusión

Este modelo hace referencia a que la fuerza adhesiva entre un adhesivo y un material se debe a la interdifusión producida entre las moléculas superficiales de los materiales sobreinyectados. Esta teoría fue propuesta por Voyutskii en 1949. Este mecanismo permite explicar cómo se produce la unión entre materiales de estructura química o δ similares, y que de esta manera se produce una migración de cadenas poliméricas fundidas, incrementando así el grado de cohesión de la interfase (Fourche, 1995).

2.2.2. Anclaje mecánico

Es la propuesta más antigua hecha por McBain en 1925. Este modelo atribuye la adhesión a la penetración del polímero dentro de los poros, irregularidades superficiales y asperezas (rugosidad) del sustrato. La propuesta afirma que mientras mayor sea la rugosidad, se incrementará el número de sitios activos de contacto que benefician la adhesión.

2.3 Medición de la resistencia adhesiva

Entre los estudios referidos a estas nuevas técnicas reportados en los últimos años se tiene como unos de los pioneros a Candal et al. (Candal et al, 2007). Estos autores estudiaron el efecto de las variables del proceso de sobreinyección sobre la resistencia de la unión adhesiva de uniones rígido-flexible. Los materiales empleados fueron un elastómero termoplástico

vulcanizado (TPV) y un Polipropileno (PP). Las variables de proceso modificadas fueron las T_f , temperatura del molde (T_m), la P_s y la v_i . La medición de la resistencia a la adherencia fue llevada a cabo mediante ensayos de tracción y se concluyó que a medida que se incrementa la T_f y la T_m , la resistencia de la unión adhesiva aumenta. Estos resultados fueron corroborados por Candal et al. (Candal et al., 2009) empleando la técnica de trabajo esencial de fractura interfacial (EWIF).

Rossa-Sierra et al. (Rossa-Sierra et al., 2009), estudiaron estructuras bicapas mediante la sobreinyección de un copolímero de PMMA con MABS y un elastómero termoplástico de poliuretano (TPU), lo que representa una unión rígido-suave, se relacionó el método de transformación y las propiedades adhesivas entre los materiales en función de las condiciones de proceso (T_f , P_i y rugosidad superficial). Para ello se llevaron a cabo ensayos mecánicos (tensión, *peeling*, impacto, flexión, mecánica de fractura y resistencia al rayado) y de caracterización (calorimetría diferencia de barrido (DSC), análisis térmico dinámico mecánico (DMTA), Espectroscopía infrarroja por Transformada de Fourier (*FT-ir*), medición del ángulo de contacto y microscopía electrónica de barrido (SEM)), obteniendo que el nivel de adhesión en la interfase se incrementa cuando la T_f y la rugosidad superficial son mayores.

Igualmente está el estudio de Candal et al. (Candal et al., 2009), donde evaluó un nuevo sistema de materiales formando estructuras rígido-suave, (ABS/TPU) con la finalidad de estudiar el efecto de las variables de proceso del segundo material (TPU sobreinyectado) mediante ensayos mecánicos de tracción, *peeling* a 180° y EWIF, observándose que la variable que tiene mayor influencia dentro del proceso, es la T_f y la v_i en menor proporción, favoreciendo la adhesión, mientras que para la P_s no se encontró ninguna influencia.

Por otro lado, Candal et al. (Candal et al., 2010) estudiaron la mejor metodología para la determinación de la resistencia de la unión adhesiva entre PP y TPV sobreinyectados. Realizaron ensayos de tracción, *peeling* y EWIF en tres geometrías (entalla simple a tracción (SENT), doble entalla a tracción (DENT) y entalla central a tracción (CCT)). Se concluyó que la técnica de *peeling* tanto a 90° como a 180° permite medir la adhesión interfacial entre materiales sobreinyectados a bajas T_f . Mediante los ensayos de tracción fue posible medir la fuerza adhesiva alcanzada pero no con tanta exactitud como con el EWIF bajo la geometría SENT, observándose que esta técnica es la que mejor se aplica para este tipo de uniones; mientras que EWIF bajo geometría DENT y CCT no funcionaron.

2.4 Biomateriales

El desarrollo de nuevos biomateriales obliga a la complementación de conocimientos provenientes de dos áreas muy diferentes: *la ciencia de materiales y la biología*. La investigación actual y futura se concentra principalmente en los siguientes temas:

2.4.1 Materiales cerámicos

Entre los más estudiados se encuentran los biovidrios y la hidroxiapatita (HA), empleados para la reparación de huesos debido a su capacidad de integración eficiente con el tejido vivo. Otro tema de investigación actual es el desarrollo de cementos quirúrgicos que contienen rellenos cerámicos provistos de actividad biológica; esto mejora la fijación y estabilización del implante a largo plazo, ya que la incorporación de rellenos promueve la diferenciación celular e induce la formación de depósitos de HA proveniente del medio biológico en la zona de contacto entre el cemento y el hueso, lo que así posibilita el crecimiento de tejido nuevo.

2.4.2 Materiales metálicos

En esta área en particular se buscan nuevas técnicas de procesamiento que permitan maximizar las propiedades mecánicas de las aleaciones actuales y lograr que sus superficies tengan texturas adecuadas para inducir la respuesta biológica deseada. Por ejemplo, está en estudio el desarrollo de microelectrodos para dispositivos neurológicos que resistan la corrosión y en particular, el fenómeno de tensión-corrosión (*stress corrosion cracking*) inducida por el medio biológico. También se está prestando atención a las propiedades superelásticas de aleaciones de níquel y titanio, y al fenómeno de memoria de forma para "stents". Los "stents" son dispositivos tubulares expansibles que se usan en medicina para mantener abiertos a conductos tales como arterias, venas, uretra, tráquea y evitar su colapso. El término superelásticos describe la capacidad de algunas aleaciones metálicas de sufrir grandes deformaciones y retornar a la forma original una vez que la fuerza que genera la deformación desaparece.

2.4.3 Materiales poliméricos

La gran variedad de formulaciones y la versatilidad de diseño de estos materiales los han convertido en los componentes más frecuentemente utilizados en la fabricación de dispositivos biomédicos. Entre los campos de estudio actual con estos materiales cabe mencionar el desarrollo de polímeros bioabsorbibles (que son degradados en el medio biológico y sus productos de degradación son eliminados mediante la actividad celular), utilizados en estructuras, en sistemas de liberación de drogas, como soporte de células vivas, en el reemplazo de tejidos, ya sean duros o blandos, y en piezas y dispositivos para la fijación de fracturas. Un tema de gran interés actual es el desarrollo de materiales híbridos, formados por la combinación de materiales sintéticos y naturales. Estos tienen múltiples aplicaciones, entre las que se pueden mencionar los biosensores (dispositivos capaces de reconocer señales químicas), los sistemas de liberación controlada de drogas y los materiales con superficies modificadas que contienen moléculas capaces de interactuar en forma específica con el medio biológico.

En este sentido, entre los estudios desarrollados en los últimos años se puede mencionar en primer lugar, las investigaciones llevadas a cabo por García-Garduños y Reyes-Gasga (García_Garduños, 2006 y Reyes-Gasga, 2006) los cuales estudiaron la biocompatibilidad de la HA y sus aplicaciones en áreas como la odontología, ortopedia, y cirugía maxilofacial. Igualmente, evaluaron diferentes tejidos vivos encontrando que se encuentra en grupos animales como los corales y estrellas de mar y estudiaron sus posibles aplicaciones en función del origen de la HA.

Posteriormente, Parra (Parra et al, 2009) estudiaron la adhesión celular de osteoblastos en materiales compuestos obtenidos con PMMA, polietileno de alta densidad (PEAD) y polipropileno (PP). Para ello, emplearon células/pozo, provenientes de ratas recién nacidas y previamente esterilizadas con radiación gamma, fueron incubadas por 16 horas a 37 °C en atmósfera de CO₂, en un medio de cultivo con SBF al 10%. Los compuestos obtenidos fueron PMMA/HA, PEAD/CaCO₃ (calcita) y PP/HA+CaCO₃, debido a las limitaciones de los reactivos iniciales en los respectivos solventes y polímeros. Obteniendo que los valores más altos de adhesión se observaron en las muestras obtenidas con el PMMA /HA y PEAD/ CaCO₃, concluyendo que ambos materiales son candidatos a biomateriales para sustitución de tejido óseo.

Este mismo año, Zhang y Lu (Zhang y Lu, 2009), estudiaron compuestos de HA/polímero para aplicaciones biomédicas mediante simulación dinámica molecular. Analizaron la energía de enlace presente entre la HA y tres diferentes polímeros: polietileno (PE), poliamida (PA) y

poliácido láctico (PLA); adicionalmente evaluaron el efecto de un agente acoplante de silano. Ellos obtuvieron que la energía de enlace para el compuesto HA/PA y HA/PLA son mucho mayores que para el compuesto HA/PE, lo cual podría ser atribuido a la presencia de un mayor número de grupos polares en las cadenas del PA y el PLA. Por otro lado, al usar el agente acoplante en los compuestos formados con HA/PE se observa una mayor energía de enlace.

3 PARTE EXPERIMENTAL

3.1 Materiales

Entre los materiales usados para el desarrollo de esta investigación se mencionan el ABS *Sinkral*[®] L320 de *POLIMERI EUROPA* y PMMA *VM100* de *ALTUGLAS*. Las principales propiedades de estos materiales se presentan en la tabla 1. (Hojas técnica de PMMA, Hoja y Hoja técnica de ABS).

PROPIEDADES		ABS	PMMA
Casa Comercial		Polimeri Europa	Altuglas
MFI	[g/10min]	27,00 (220/10)	14,50 (230/3,80)
MVR	[cm ³ /10min]	-	-
Absorción de H ₂ O	[%]	0,3	0,3
Densidad	[g/cm ³]	1,040	1,180
Esfuerzo a Tensión	[MPa]	45,00	65,00
Temperatura de inyección	[°C]	230	200
Parámetro de solubilidad	[MPa ^{1/2}]	-	9,0-9,5

Tabla 1: Propiedades físicas de las resinas empleadas.

3.2 Procedimiento Experimental

Para llevar a cabo la sobreinyección fue necesario realizar pruebas previas que dieran cabida a sistemas de materiales adecuados para el desarrollo de la investigación. De esta manera, para elegir estos materiales se realizó una revisión bibliográfica sobre las características que deben tener cada uno de los polímeros para ser empleados en el proceso de sobreinyección. Es por esta razón que fueron elegidos, principalmente, estos polímeros por las ventajas mencionadas previamente; además de considerar la compatibilidad y similitud en sus δ (Weng et al., 2000).

3.3 Condiciones de inyección

Para la sobreinyección se empleó el sistema PMMA/ABS, por lo que, las variables de proceso evaluadas fueron la T_i , la v_i y la P_s del PMMA, partiendo igualmente de trabajos previos llevados a cabo por Candal et al (Candal et al, 2007) y aplicando una T_m constante de aproximadamente 23 °C, ellas se muestran en la tabla 2.

CONDICIÓN	V_i [g/s]	P_s [MPa]	T_i [°C]	RUGOSIDAD [mm]
L1	3	3,3	215	2,5
M1	3	3,3	230	2,5
H1	3	3,3	245	2,5
H2	3	4,4	245	2,5
H3	3	5,5	245	2,5
H4	4	3,3	245	2,5
H5	5	3,3	245	2,5
H6	3	3,3	245	0,8

Tabla 2: Condiciones de procesos usadas en la sobreinyección lateral

3.4 Probetas para los ensayos de tensión

Para los ensayos de tensión se diseñaron probetas sobreinyectadas con el sistema PMMA/ABS haciendo uso de un molde de placas de 3 mm de espesor. Para su diseño se colocó la media placa de ABS dentro de la cavidad del molde (Figura 1 (a)) y consecutivamente se sobreinyectó el PMMA, obteniendo finalmente una placa como la mostrada en la figura 1 (b).

Finalmente, se troquelaron cuatro probetas rectangulares por placa (Figura 2 (a)) con una dimensión de 100 mm x 25 mm cada una (Figura 2 (b)). De esta manera, a partir de estas probetas fue posible medir la fuerza a la adherencia entre los dos materiales que conforman cada sistema de estudio aplicando un ensayo de tracción convencional.

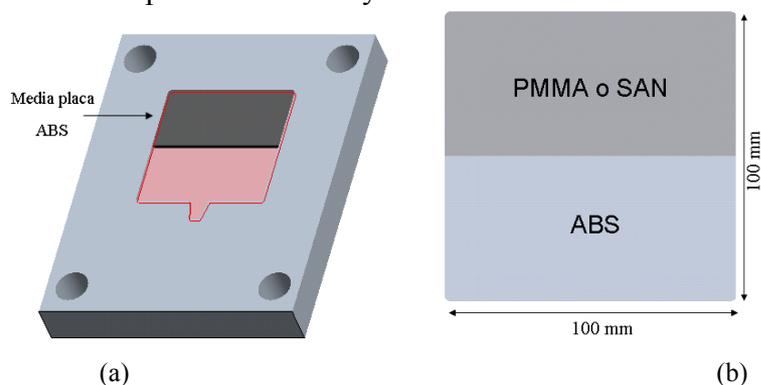


Figura 1: (a) Esquema de la colocación del sustrato en la cavidad del molde para el diseño de placas sobreinyectadas. (b) Esquema de la placa sobreinyectada

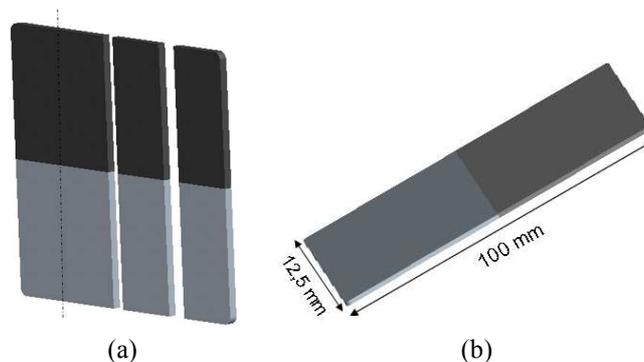


Figura 2: (a) Esquema del diseño de las probetas para los ensayos de tracción. (b) Esquema de la probeta diseñada para los ensayos de tracción, con 3 mm de espesor

4 RESULTADOS Y DISCUSIONES

En la actualidad, el desarrollo de nuevas técnicas de inyección para el desarrollo de piezas plásticas ha avanzado exponencialmente. Sin embargo, dichas técnicas no han sido estudiadas a profundidad, por lo que no existe prácticamente registro acerca de la aplicabilidad de las mismas.

4.1 Sistema de sobreinyección y Condiciones de inyección

En general, el nivel de adhesión alcanzada será función de la combinación de los materiales, puesto que ello dependerá de la similitud que exista en la estructura química de ambos y de sus δ . Sin embargo, hay que tener presente que esta aproximación no asegura una buena adhesividad, puesto que ello siempre dependerá de los parámetros de proceso usados en cada etapa del mismo. Una vez diseñadas las placas de sobreinyección, se propuso llevar a cabo ensayos de tensión, basados en estudios previos llevados a cabo por Weng et al., (Weng, 2000).

4.2 Ensayos de tensión

Para evaluar el efecto provocado por las variables de proceso en las piezas sobreinyectadas se propuso como metodología inicial llevar a cabo ensayos de tracción, partiendo de estudios previos (Saleh, 2005), por lo que se procedió a evaluar el nivel de adhesión interfacial formado por los materiales, permitiendo medir cuantitativamente la resistencia máxima que soportan, a través de la aplicación de fuerza.

De esta manera se llevaron a cabo los ensayos de tracción, obteniéndose en cada caso, curvas de fuerza a la ruptura en función del desplazamiento, en las cuales se observaron puntos de fractura, típicamente observadas en materiales frágiles. Finalmente, se procedió a seleccionar la fuerza máxima de adhesión obtenida para cada condición para todos los ensayos de tracción en función de las variables de proceso, garantizando un buen contacto entre el sustrato y el polímero fundido.

4.2.1 Efecto de la velocidad de inyección (v_i)

La primera variable de estudio fue la v_i , esta variable está relacionada con el tiempo que tarda el material fundido en llegar a la interfase. Se varió el perfil de velocidad desde 3 g/s hasta 5 g/s, limitados por la ventana de proceso del material obteniendo la tendencia mostrada en la figura 4.

En la figura 4 se observa que, para el sistema de estudio, la v_i genera un efecto influyente sobre el nivel de adhesión interfacial, notándose que los niveles de fuerza adhesiva encontrados superan los 1300 N, lo cual representa un nivel de adhesión bastante alto en comparación con los resultados previos (Rossa-Sierra et al. 2009, Candal et al. 2008, Candal et al. 2009, Candal et al. 2010), por lo que es posible afirmar que se obtuvo una muy buena adhesión interfacial. Sin embargo, se observa una doble tendencia de la fuerza adhesiva en función de la v_i mostrando mayores registros de fuerza a la menor y mayor velocidad, lo cual coincide con las investigaciones llevadas a cabo por los investigadores mencionados.

Por lo que, al incrementar la v_i , se produce una elevación en la temperatura interfacial del sistema producto de las altas velocidades, las cuales, probablemente, promueven un calentamiento viscoso y en consecuencia una mayor temperatura en el fundido, provocando, un mayor reblandecimiento superficial en el sustrato, lo cual favorece la interdifusión molecular y, en consecuencia, se observa una mayor resistencia de la unión adhesiva. Mientras que a bajas v_i se tiene que el polímero fundido posee menores niveles de orientación

y una mejor transmisión de la presión de inyección, por lo que al entrar en contacto con el sustrato (ABS) se favorece el mojado superficial mejorando la interdifusión molecular, por lo que se observa, de igual manera, una mayor resistencia de la unión adhesiva.

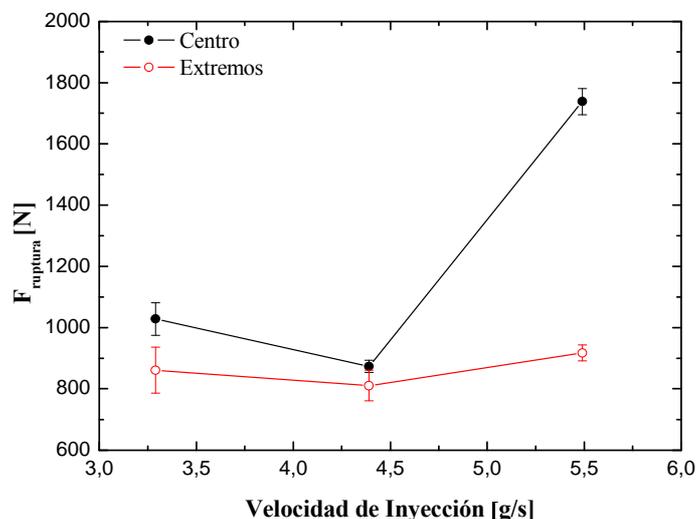


Figura 4: Efecto de la velocidad de inyección en la resistencia a la adherencia en el sistema PMMA/ABS.

4.2.2 Efecto de la presión sostenida (P_s)

Se procedió a evaluar el efecto de la P_s sobre la fuerza de adhesión en la interfase, para ello se aplicaron presiones entre 3 y 5 MPa, obteniendo las fuerzas mostradas en la figura 5.

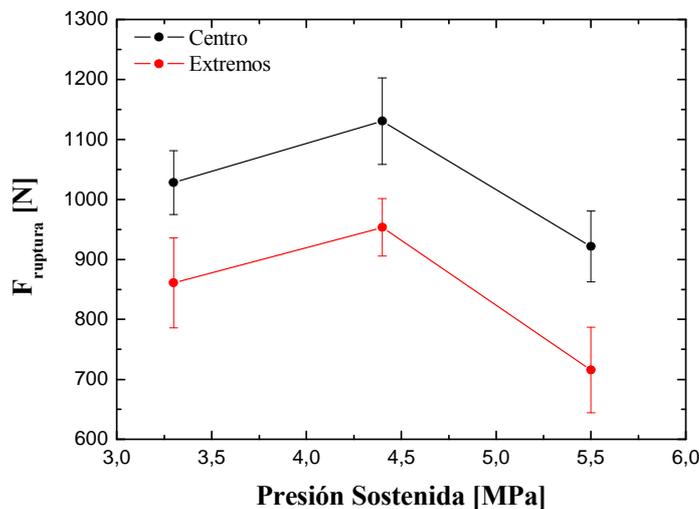


Figura 5: Efecto de la presión sostenida en la resistencia a la adherencia en el sistema PMMA/ABS.

Este comportamiento se debe al hecho de que esta presión es aplicada posterior al llenado de aproximadamente el 90% de la cavidad, lo que trae como consecuencia que el material que se encuentra en contacto con el sustrato (ABS) ya ha iniciado su solidificación o su enfriamiento propiamente dicho. Es posible afirmar que la P_s no influye de manera considerable en el nivel de adhesión final de los materiales, lo cual coincide con las conclusiones expuestas (Candal et al., 2007); es decir, el incremento de la P_s no favorece la mojabilidad o reblandecimiento del sustrato, por lo que no se evidencian cambios sustanciales en los niveles de adhesión.

4.2.3 Efecto de la temperatura de inyección (T_f)

Finalmente, se evaluó el efecto de la T_i , la cual, es la variable de mayor influencia en el proceso de sobreinyección (Candal et al., 2007, Rossa-Sierra et al., 2009; Candal et al., 2009 (a), Candal et al., 2010), como se mencionó anteriormente. Para ello se varió, únicamente, la T_f en 15 °C desde 230 °C hasta 250 °C, obteniendo las tendencias mostradas en la figura 6.

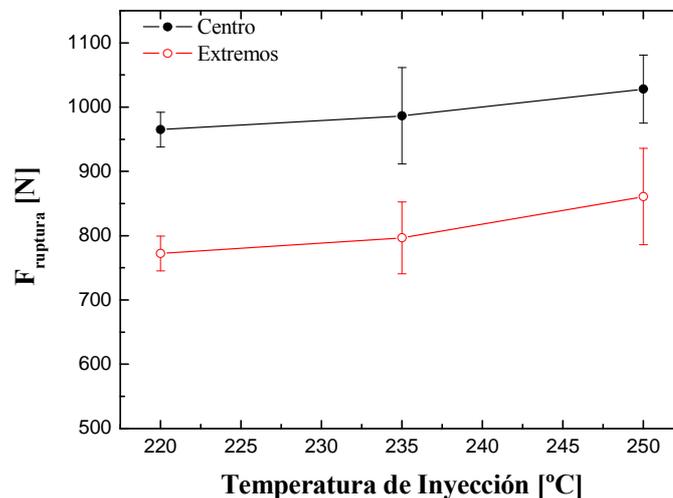


Figura 6: Efecto de la temperatura de inyección en la resistencia adhesiva para el sistema PMMA/ABS.

En este sentido, al observar la figura 6, se evidencia que la variación de la T_i no provoca grandes variaciones en la resistencia de la unión adhesiva, observándose un comportamiento casi constante. De esta manera se tiene que, dicho comportamiento podría deberse a que, para el rango de temperatura de inyección usado, el fundido ya ha alcanzado su máxima capacidad de mojabilidad, por lo que los niveles de adherencia no se ven afectados de manera notoria al incrementar dicha temperatura.

Sin embargo, al comparar la fuerza obtenida en este caso, la cual es de aproximadamente 1000 N, con las fuerzas generadas por efecto de la v_i , se observa que el nivel de adhesión interfacial obtenido por efecto de esta última variable es levemente mayor, por lo que es posible afirmar que sí se alcanzó una buena adhesión en la interfase a pesar de no observar una tendencia clara en función de la T_i , es decir, se alcanza un alto calentamiento viscoso y una adecuada transmisión de la presión, permitiendo que el polímero fundido adquiriera mayor movilidad, lo que favorece la interdifusión de las moléculas sobre la superficie del sustrato reblandecido.

5 CONCLUSIONES

A partir de los resultados expuestos se tiene, en primer lugar que, el principal mecanismo de adhesión interfacial observado fue la difusión molecular y, que la adhesión interfacial para los sistemas de unión con estructura rígido-rígido, dependerá del grado de similitud entre los δ que posean cada uno de los materiales a usar, los cuales deben favorecer el mecanismo de interdifusión molecular.

Por otro lado, en cuanto a las condiciones de proceso, se observó que la T_f afecta la adhesión interfacial promoviendo la resistencia adhesiva con el incremento de la misma, mientras que la P_s y la v_i manifiestan una doble tendencia con el incremento o la disminución de las mismas.

Finalmente, a partir de los resultados expuestos se puede afirmar que la técnica de sobreinyección puede ser usada satisfactoriamente para el diseño y desarrollo de piezas

médicas que se fabrican a partir de materiales de estructura rígida.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el Decanato de Investigación y Desarrollo de la Universidad Simón Bolívar (USB, Venezuela) y por el Centro Catalán del Plástico, asociado a la Universidad Politécnica de Cataluña (CCP, UPC, Barcelona, España). Todos los estudios fueron realizados en la sección de polímeros del Laboratorio E de la USB, en el laboratorio de microscopía de la UPC y en el CCP. La primera autora desea agradecer al Decanato de Postgrado de la USB y al FONACIT (Venezuela) por todo el apoyo prestado durante su investigación en la Universidad Simón Bolívar.

REFERENCIAS

- Avery, J., Injection molding alternatives. A guide for designers and product engineers, Hanser Publishers, Munich, 1998.
- Candal, M., Gordillo, A., Santana, O., and Sánchez, J., Study of adhesion strength on overmoulded plastic materials using the essential work of interfacial fracture (EWIF) concept, *Journal of Materials Science*, 43, 15:5052-5060, 2008.
- Candal, M., Gordillo, A., Terife, G., and Santana, O., Effect of the process conditions over the adhesion between two overmolded polymers, *SPE's ANTEC Proceedings*, 620, 2007.
- Candal, M., Méndez, Y., y Morales, R., Efecto de las variables de proceso del sustrato (PP) sobre la adhesión entre materiales sobreinyectados (PP-EPDM). Coloquio venezolano de polímeros, La Guaira, 2009.
- Candal, M., Mendez, Y., Morales, R., Effect of the preheated of the substrate over the adhesion between overmolded polymers (PP-EPDM), *APST one (advances in polymer science and technology)*, Austria, 2009.
- Candal, M., Mendez, Y., and Morales, R., Effect of the substrate process conditions over the adhesión between overmolding polymers (PP-EPDM), *Epf '09 european polymer congress*, Austria, 2009.
- Candal, M., Terife, G., Gordillo, A., Santana, O., and Sánchez, J., Methodology for the study of the adhesion strength between two overmolded materials, *Journal of Adhesion and Adhesives*, 2010. .
- Fourche, An overview of the basic aspects of polymer adhesion. Part I. Fundamentals, *Polymer Engineer and Science* 35(12): 957, 1995.
- García-Garduños, M., Reyes-Galga, La hidroxiapatita, su importancia en los tejidos mineralizados y su aplicación biomédica, *Tip Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 9, 2:90-95, diciembre, 2006.
- Lauke, B., and Schüller, T., Essential Work of Interfacial Fracture: A Method to Characterise Adhesión at Polymer-Polymer Interfaces, *International Journal of Adhesion & Adhesives* 21 (1):55-58, 2001.
- Martínez, M., Adhesión y uniones adhesivas, *CYTED*, Universidad de Alicante, Alicante, 1998.
- Parra, C., Gonzalez, G., y Albano, C., Caracterización por MEB de la interacción de células osteoblásticas con materiales compuestos polímero/hidroxiapatita y polímero/calcita”, *Acta Microscópica*, 18:367-368, 2009.
- Rossa-Sierra, A., Study of the interface behaviour between MABS/TPU bi-layer structures obtained through over moulding. *Journal Materials and Design*, 30:3979-3988, 2009.
- Saleh, H., Metodología para la caracterización del proceso de bi-inyección de materiales plásticos. Aplicación a la inyección de probetas de ensayo por tracción, Centro Politécnico de Zaragoza, Departamento de Ingeniería Mecánica, España, 2005.
- Weng, D., Andries, J., Morin, P., Saunders, K. and Politis, J., Fundamentals and Material Development for thermoplastic Elastomer (TPE) Overmolding, *Journal of injection molding technology*, 4 (1):22-28, 2000.
- Young, R., and Lovell, P., *Introduction to Polymers*, CRC Press, Boca Raton, 1991.
- Zhang, H., Lu, X., Molecular dynamics simulations on the interaction between polymers and hydroxyapatite with and without coupling agents, *Acta Biomaterialia Inc. Published by Elsevier*

Ltd, 5(4):1169-1181, 2008.