

ESTUDIO DE LA ADHESIÓN EN UNIONES POLIMÉRICAS SOBREINYECTADAS RÍGIDO–RÍGIDO (ABS/SAN)

Everling Dávila¹, María Virginia Candal^{1*}, Miguel Sánchez–Soto²

1) Grupo de Polímeros USB, Departamento de Mecánica, Universidad Simón Bolívar, Apartado 89000. Caracas 1080–A, Venezuela. Correo electrónico: mcandal@usb.ve

2) Centre Català del Plàstic, Universitat Politècnica de Catalunya, c/ Colom 114, 08222–Terrassa, Barcelona, España.

Recibido: Junio 2013; Aceptado: Julio 2013

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue estudiar el efecto de las variables del proceso de sobreinyección sobre la resistencia de la unión adhesiva rígido–rígido entre un par de materiales poliméricos. Se emplearon como materiales el estireno–acrilonitrilo (SAN) y el acrilonitrilo–butadieno–estireno (ABS). Se evaluó el efecto de las condiciones de proceso ($P_{\text{sostenida}}$, $V_{\text{inyección}}$, T_{fundido}) del material sobreinyectado en la adhesión mediante ensayos mecánicos de tracción, trabajo esencial de fractura interfacial empleando geometría DENT, además de mecánica de la fractura interfacial elástico–lineal. Se obtuvo un incremento de la resistencia de unión adhesiva al aumentar la temperatura de fundido y la rugosidad de la superficie de contacto del sustrato con el material sobreinyectado.

Palabras claves: Inyección multicomponente, sobreinyección, Acrilonitrilo–butadieno–estireno, Estireno–acrilonitrilo.

ABSTRACT

The aim of this research was to study the effect of the overmolding process conditions over the adherence resistance between two polymeric materials that forming a structure hard–hard. Styrene–acrylonitrile (SAN) and acrylonitrile–butadiene–styrene (ABS) were used. The effect of the overmolding process conditions ($P_{\text{holding/packing}}$, $V_{\text{injection}}$, $T_{\text{injection}}$) over the adherence strength was studied. These systems were evaluated by tensile test, essential work of interfacial fracture by using DENT geometry and lineal elastic interfacial fracture mechanics. Major adherence resistance was obtained when increasing the melt temperature of the overmolding polymer and the rugosity of the contact's surface of the substrate.

Key words: Multicomponent injection molding, overmolding, Acrylonitrile–Butadiene–Styrene, Styrene–Acrylonitrile.

INTRODUCCIÓN

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, ciclos más cortos, mayor productividad y menores costos [Beaumont et al. 2002]. La inyección multicomponente o sobreinyección es una nueva técnica del proceso de 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 [Avery 1998].

La aplicación de esta técnica 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, por lo que es importante estudiar y entender el mecanismo de adhesión que se lleva a cabo entre los materiales sobreinyectados. Por un lado, será necesaria la compatibilidad

entre los materiales elegidos, lo cual se regirá, principalmente, por la similitud que exista entre los parámetros de solubilidad o con la adición de agentes compatibilizantes. Por otro lado, debe existir buen contacto superficial entre las zonas de unión, y alcanzar una adecuada combinación de las variables de proceso establecidas en la inyección del segundo material, puesto que las mismas permitirán mejorar dicha adhesión en la interfase de unión [Weng et al. 2000].

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, el presente estudio pretende analizar los mecanismos de adhesión que actúan entre las superficies sobreinyectadas de materiales que forman uniones rígido-rígido. Para ello, se emplearon materiales como el SAN (material sobreinyectado) y el ABS (sustrato), par de materiales con algunas ventajas que permitirían su empleo en aplicaciones automotrices.

Sobreinyección. La inyección de multicomponentes o sobreinyección es un proceso mediante el cual se sobreinyecta un material, que puede ser un polímero duro o blando con un material (típicamente un plástico rígido conocido como sustrato). Si se selecciona adecuadamente, el polímero sobreinyectado y sus condiciones de proceso de inyección se forma un fuerte enlace con el material del sustrato. El uso de pegamentos, adhesivos o aditamentos mecánicos (tornillos) ya no es requerido para lograr una óptima unión entre los dos materiales. Esta técnica se puede llevar a cabo de dos maneras, a partir de la colocación del sustrato como un inserto en el molde e inyectar el segundo material o simplemente, llevar a cabo la inyección del sustrato y la posterior, sobreinyección del segundo material empleando un mismo molde y dos máquinas de inyección.

La principal ventaja de emplear el moldeo por sobreinyección empleando la inserción de sustrato es que se pueden emplear las máquinas convencionales de inyección y anexar un robot. Por otro lado, el moldeo multicomponente llevado a cabo en un misma etapa requiere dos máquinas de inyección en las que se fundirán e inyectarán dos polímeros diferentes, hacia un mismo molde. La importancia de esto, es reducir los tiempos de ciclo y los costos de mano de obra [Avery 1998].

Mecanismos de adhesión. El nivel de adhesión alcanzado será función de la combinación de los materiales, sin embargo, hay que tener presente que esta aproximación no asegura una buena adhesión, puesto que ello siempre dependerá de los parámetros de proceso usados en cada etapa (Wu 1982; Fourche 1995; Pocius 2002).

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).

El modelo de la difusión hace referencia a que la fuerza adhesiva se debe a la interdifusión

producida entre las moléculas superficiales de los materiales sobreinyectados. Esta teoría fue propuesta por *Voyutskii* en 1949 (*Fourche* 1995) y permite explicar cómo se produce la unión entre materiales de estructura química o parámetros de solubilidad similares y que, de esta manera, se produce una migración de cadenas poliméricas solubles o fundidas incrementando el grado de cohesión de la interfase (*Martínez* 1998).

Por otro lado, el anclaje mecánico es la propuesta más antigua hecha por *McBain* en 1925 (*Fourche* 1995). Este modelo atribuye la adhesión a la penetración del polímero dentro de los poros, irregularidades superficiales y asperezas del sustrato. La propuesta afirma que mientras mayor sea la rugosidad, se incrementará el número de sitios activos de contacto que beneficien la adhesión. (*Martínez* 1998).

Medición de la resistencia a la adhesión. La resistencia de la unión adhesiva es una medida que indica que tan fuerte es la unión formada entre dos materiales. Ésta es medida en términos de fuerza, esfuerzos, energía o trabajo requerida para romper la interfase formada.

Entre los estudios encontrados en la bibliografía relacionados con el estudio de la resistencia de la unión adhesiva de piezas fabricadas por moldeo por inyección multicomponente se encuentran los realizados por *Candal et al.* (2007, 2008) quienes evaluaron la resistencia de la unión adhesiva entre PP y TPV sobreinyectados empleando las técnicas de tracción y EWIF en tres geometrías SENT, DENT y CCT. Los autores concluyeron que las técnicas de tracción y trabajo esencial de fractura interfacial (EWIF) con geometría SENT permiten medir la resistencia de la unión adhesiva en uniones rígido–suaves dando buenos resultados. Estos autores encontraron que a medida que la temperatura de fundido del material sobreinyectado aumenta, la resistencia de la unión adhesiva PP/TPV se ve incrementada.

Posteriormente, *Rossa–Sierra et al.* (2009), estudiaron estructuras bicapas mediante la sobreinyección de un copolímero de PMMA con metil–acrilonitrilo–butadieno–estireno (MABS) y un elastómero termoplástico de poliuretano (TPU), lo que representa una unión rígido–suave. Los autores relacionaron el método de transformación y las propiedades de los materiales en función de las condiciones de proceso empleadas (T_{fundido} , $P_{\text{inyección}}$ y rugosidad superficial). Para ello se llevaron a cabo ensayos mecánicos (tensión, peeling, impacto, flexión, mecánica de fractura y resistencia al rayado) obteniendo que el nivel de adhesión en la interfase se incrementa cuando la temperatura de inyección y la rugosidad superficial son mayores.

Igualmente, se encuentra el estudio de *Candal et al.* (2009a y 2009b), donde se 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 inyectado (TPU) sobre la resistencia de la unión adhesiva. Para ello emplearon ensayos mecánicos de tracción, pelado a 180°

y EWIF, observándose que la variable que tiene mayor influencia dentro del proceso, es la temperatura de fundido y la velocidad de inyección en menor proporción, favoreciendo la adhesión, mientras que para la presión sostenida no se encontró ninguna tendencia particular.

PARTE EXPERIMENTAL

Materiales. Entre los materiales usados se encuentran ABS *Sinkral*[®] L320 de Polimeri Europa y SAN Luran KR2636 de BASF. Sus principales propiedades se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades físicas de las resinas empleadas.

PROPIEDAD		ABS	SAN
MFI	g/10 min	27,00 (220/10)	–
MVR	cm ³ /10 min	–	19 (220/10)
Absorción de H ₂ O	%	0,3	0,2
Densidad	g/cm ³	1,040	1,080
Esfuerzo a tensión	Mpa	45,00	70,00

Condiciones de inyección. Todas las probetas ensayadas fueron inyectadas empleando una máquina de inyección MATEU & SOLÉ *Meteor 440/90*, con un molde para placas de 100·100 mm. Para moldear las probetas de tracción, se colocaron placas de ABS de 100·50·3 mm como inserto dentro del molde (sustrato) (Figura 1), y posteriormente, se sobreinyectó SAN (Figura 2). Finalmente, se cortaron cuatro probetas a partir de cada placa bimaterial (Figura 3). Las dimensiones finales de las probetas fueron de 100·25·3 mm³.

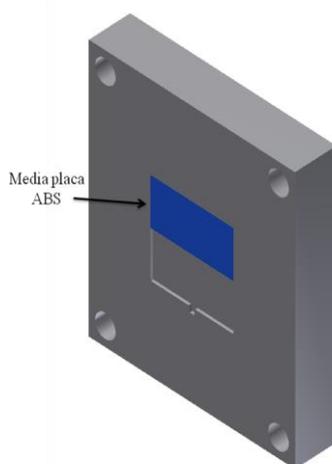


Figura 1. Esquema de la colocación del sustrato en la cavidad del molde para el diseño de placas sobreinyectadas.

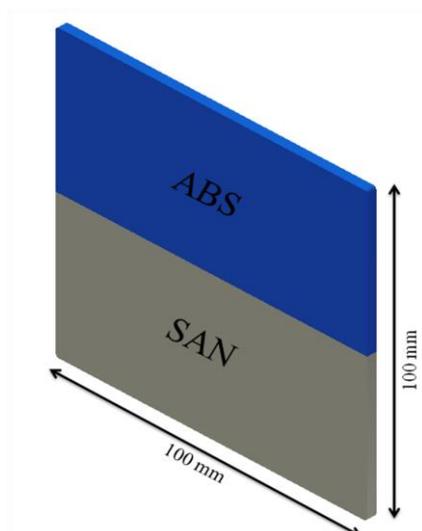


Figura 2. Esquema de la placa sobreinyectada con estructura rígido-rígido.

Las condiciones de proceso empleadas para inyectar el sustrato de ABS fueron constantes durante todo el estudio ($T_{\text{inyección}} = 230^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{sostenida}} = 3,3 \text{ MPa}$, $v_{\text{inyección}} = 3,87 \text{ g/s}$). Por otro lado, la condiciones de proceso usadas para el SAN se presentan en la Tabla 2, siendo la temperatura de inyección ($T_{\text{inyección}}$), velocidad de inyección ($v_{\text{inyección}}$) y la presión sostenida ($P_{\text{sostenida}}$). La temperatura del molde se mantuvo constante (23°C).

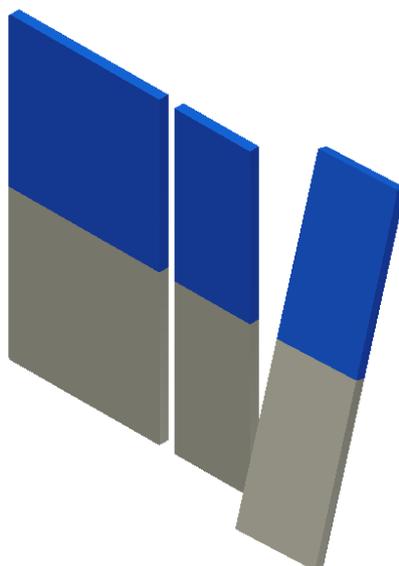


Figura 3. Esquema del diseño de las probetas para los ensayos de tracción.

Por cada condición, se moldearon y ensayaron cinco probetas. Adicionalmente, se evaluó el efecto de la rugosidad superficial del sustrato en el nivel de adhesión entre los materiales, a dos niveles de rugosidad.

Tabla 3. Condiciones de procesos usadas en la sobreinyección lateral.

Condición	V _{inyección} g/s	P _{sostenida} MPa	T _{inyección} °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

*siendo L= low temperature = baja temperatura de fundido, M = medium temperature = temperatura media de fundido y H = high temperature = alta temperatura de fundido.

Diseño de probetas para los sistemas rígido-rígido. Para los sistemas de sobreinyección con estructura rígido-rígido se propusieron tres metodologías de evaluación; ensayos de tracción, trabajo esencial de fractura interfacial (EWIF) y mecánica de la fractura interfacial elástico lineal (LEIFM), por lo que fue necesario diseñar tres tipos de probetas diferentes.

a) Probetas para los ensayos de tensión: las probetas empleadas para tracción son las presentadas en la Figura 4.

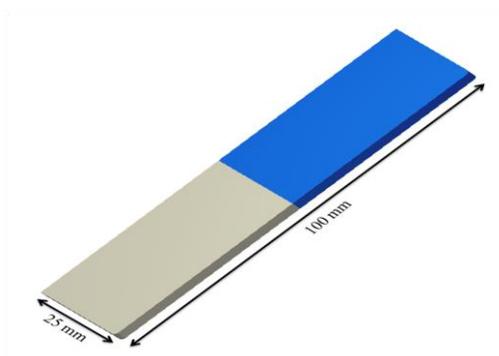


Figura 4. Esquema de la probeta diseñada para los ensayos de tracción, con 3 mm de espesor.

b) Probetas para los ensayos de trabajo esencial interfacial de fractura (EWIF): para evaluar la resistencia de la unión adhesiva aplicando el concepto de EWIF, se propuso la geometría DENT, la cual se obtuvo a partir de de dos medias placas adheridas con una dimensión de 100·50 mm² cada una y se entallaron por cada lado (Figura 5). Se seleccionaron 8 longitudes de ligamento que van de

6 hasta 20 mm, siguiendo la norma ESIS (2001).



Figura 5. Probetas para la aplicación del concepto de EWIF con geometría DENT.

c) Probetas para los ensayos de mecánica de la fractura elástico lineal (LEIFM): para el diseño de las probetas usadas se aplicó el protocolo de mecánica de la fractura elástico lineal que expresa que la dimensión de la probeta dependerá del espesor de la placa, el cual es de 3 mm. Siguiendo la metodología mostrada en la Figura 6, y considerando que $4B > W \geq 2B$, se obtuvieron probetas de $10 \cdot 60 \text{ mm}^2$, a las cuales se le aplicó un ensayo de flexión en tres puntos, a partir del cual fue posible obtener un valor de resistencia en la interfase, que posteriormente, se relacionará con los niveles de adherencia obtenidos en dicha zona.

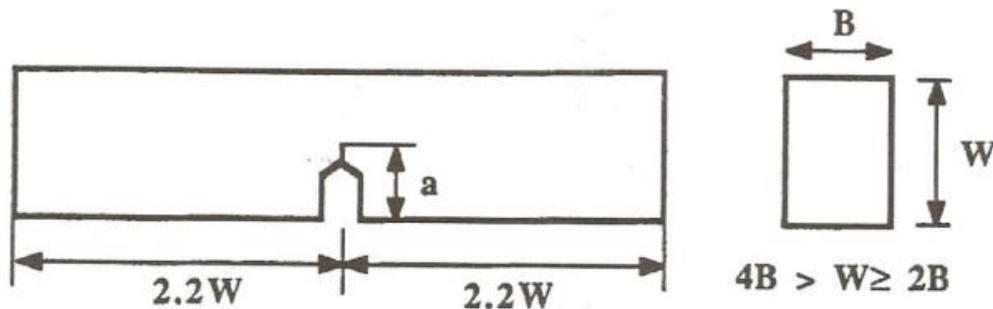


Figura 6. Esquema de la probeta para el ensayo de LEFM.

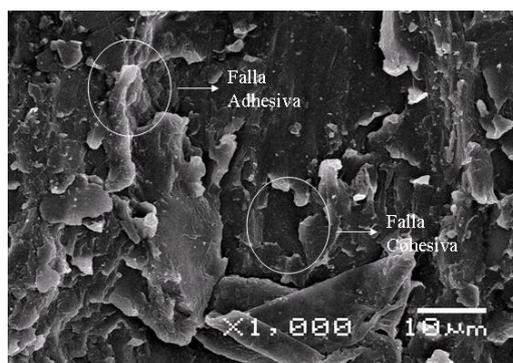
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El sistema propuesto es una estructura sobreinyectada usada principalmente en piezas plásticas sometidas a impacto e intemperie, por lo que aplica perfectamente para piezas en la industria automotriz. Para la evaluación de la adhesión entre estructuras poliméricas no se encontraron normas específicas, por lo que se propusieron diferentes diseños de probetas basados en investigaciones previas (Lauke y Shüller 2001; Candal et al. 2007, 2008, 2009a, 2009b; Rossa et al. 2009), y de esta manera, determinar la mejor metodología para evaluar la adhesión producida entre

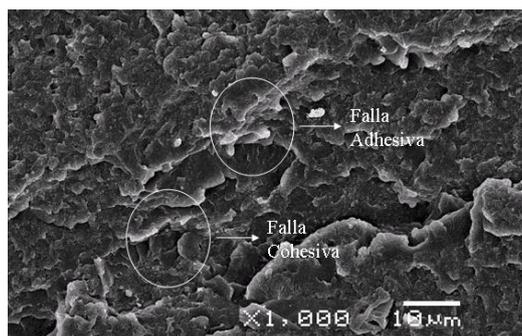
dos materiales que forman una interfase rígido/rígido. De allí que se propuso aplicar ensayos de tracción, EWIF y LEIFM.

Por otro lado, partiendo del sistema propuesto, SAN/ABS, se definieron las condiciones de proceso para la inyección del SAN. Se evaluó cada parámetro, atendiendo al llenado completo de la cavidad, considerando el mismo como un valor mínimo, y la formación de rebabas, como un valor máximo de evaluación, además de lograr un sistema altamente compatible con el ABS (sustrato).

Microscopía electrónica de barrido (SEM). Se verificó la diversidad de fallas obtenidas en la interfase de unión de los sistemas rígido-rígido aplicando SEM, confirmando la presencia de un mecanismo de falla mixto (Figura 7). Se eligieron las condiciones extremas propuestas, las cuales corresponden a la condición en la cual se aplicaron los máximos de velocidad y temperatura de inyección, obteniendo el comportamiento mostrado en la Figura 7a y la condición de sobreinyección con la superficie de contacto pulida obteniendo las características mostradas en la Figura 7b.



(a)



(b)

Figura 7. Fotografías obtenidas mediante SEM a condiciones extremas de temperatura y rugosidad. (a) Condición H5, (b) Condición L1.

Se observa en la Figura 7 que las zonas que revelan falla cohesiva, son aquellas en las cuales se evidencian zonas sombreadas y marcadas, producto del contacto con otra superficie; y zonas con falla adhesiva, en las cuales se evidencian restos de un material en el otro, producto de la adhesión alcanzada entre ellos.

Ensayos de tensión. Para evaluar el efecto provocado por las variables de proceso en las piezas sobreinyectadas con uniones rígido-rígido, se propuso como metodología inicial llevar a cabo ensayos de tracción, partiendo de estudios previos (Candal et al. 2007). Se evaluó el nivel de adhesión interfacial formado por los materiales sobreinyectados, midiendo cuantitativamente la resistencia máxima que soportan, a través de la aplicación de fuerza.

Para obtener un valor suficientemente veraz de la medida de resistencia de la unión adhesiva entre los materiales que conforman cada sistema de sobreinyección propuesto, se tomó el promedio de cinco probetas por condición en cada uno de los ensayos mecánicos, considerando un margen de error igual o menor al 10%. Para evaluar el efecto de las variables de proceso en la calidad de la adhesión en la interfase, se variaron las condiciones de inyección del segundo material, ya que éste es el que genera variaciones en los niveles de adhesión interfacial (Candal et al. 2009a y 2009b), por lo que, partiendo de estos antecedentes, se evaluó el efecto de las variables de proceso ($V_{\text{inyección}}$, $P_{\text{sostenida}}$ y $T_{\text{inyección}}$).

Se incorporó la rugosidad como una cuarta variable de estudio, ello debido a que la superficie generada mediante el corte presentó un nivel de rugosidad no estandarizado, representando un posible error adicional (Liu et al. 2008), observando que mientras mayor era la porosidad superficial del sustrato, mayor fue la adhesión obtenida entre los materiales. Se propuso controlar la rugosidad superficial puliendo dicha superficie con dos niveles de rugosidad diferentes.

De esta forma, 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 presentes en materiales frágiles que alcanzaron niveles de fuerza a la ruptura de aproximadamente 1 kN.

a) Efecto de la velocidad de inyección: la primera variable de estudio fue la velocidad de inyección, para la cual se fijó una presión sostenida y una temperatura de inyección. 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 hasta 5 $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$, limitados por la ventana de proceso del material obteniendo la tendencia mostrada en la Figura 8.

A partir de la Figura 8 se observa que para el sistema de estudio ABS/SAN, la velocidad de inyección genera un efecto influyente sobre el nivel de adhesión interfacial, notándose que los niveles de fuerza adhesiva superan los 1,3 kN, representando un nivel de adhesión bastante alto en comparación con los resultados previos (Candal et al. 2007, 2009a, 2009b), por lo que es posible afirmar que se obtuvo una muy buena adhesión interfacial y que el anclaje formado en la interfase permite adquirir la movilidad o elasticidad necesaria para soportar cierto nivel de esfuerzos, deformándose microscópicamente en esa zona. Así, 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, tomando probetas tanto del centro como de los extremos de la placa.

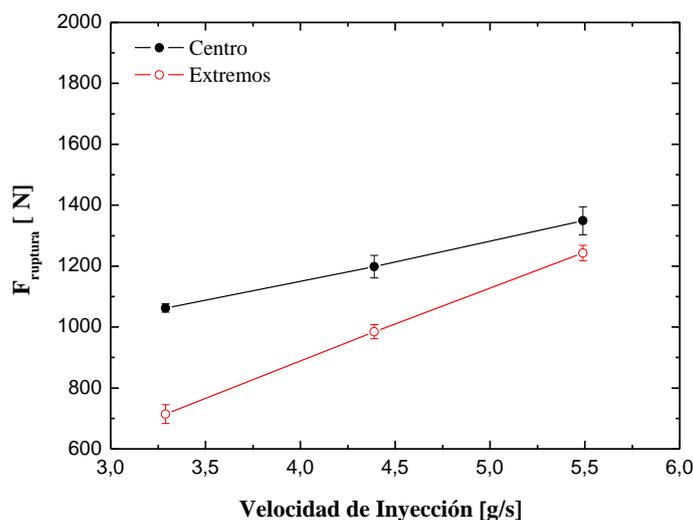


Figura 8. Efecto de la velocidad de inyección en la resistencia a la adherencia en el sistema rígido-rígido SAN/ABS.

Se observa que la resistencia de la unión adhesiva se incrementa en función de la velocidad de inyección, lo cual difiere de los resultados previos encontrados para los diferentes sistemas de estudio rígido/suave presentados por *Candal et al.* (2007, 2009a, 2009b). Por lo que se podría afirmar que, para este sistema en particular se están empleando velocidades elevadas, evidenciando únicamente un lado de la tendencia típica encontrada para esta variable, favoreciendo la adhesión. Todos los autores anteriormente reportados encontraron que para uniones rígido/suave, a medida que se incrementa la velocidad de inyección, la fuerza de adherencia disminuye hasta cierto valor y luego se incrementa.

Adicionalmente, se puede observar que los valores de la fuerza de adherencia encontrados a partir de las probetas obtenidas de la zona central de la placa son mayores a las encontradas en las probetas obtenidas de los laterales, lo cual coincide con las conclusiones de otros autores (*Rossa et al.* 2009; *Candal et al.* 2007, 2009a, 2009b). Ello podría deberse a que el material fundido en el centro de la cavidad tiene menos contacto superficial o una menor transferencia de calor con el molde que los laterales, por lo que el material en el centro tiene mayor tiempo para relajar tensiones y propiciar una mayor interdifusión molecular favoreciendo la adhesión entre los materiales. Igualmente, se tiene que el llenado de la cavidad sigue un patrón de flujo, lo cual favorece el contacto del material más caliente tenga contacto con el centro del sustrato beneficiando el mojado y la interdifusión en esta zona.

b) Efecto de la presión sostenida: se procedió a evaluar el efecto de la presión sostenida sobre

la fuerza de adherencia en la interfase, aplicando presiones entre 3 y 5 MPa, obteniendo las fuerzas mostradas en la Figura 9, donde se observa que no existe una tendencia clara acerca del efecto de la presión sostenida sobre la fuerza de adherencia interfacial.

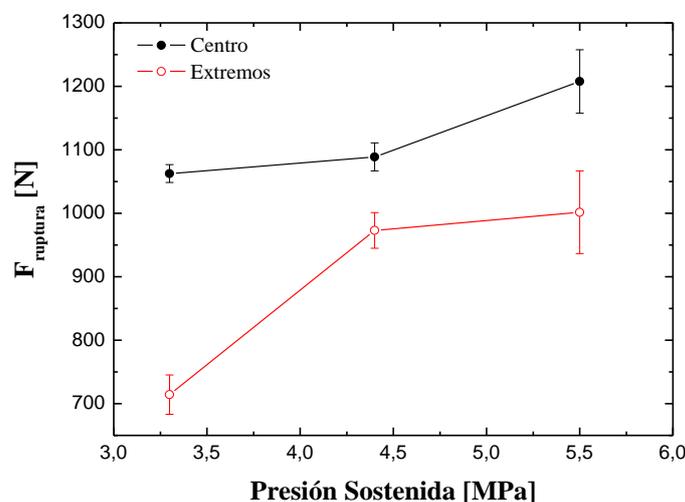


Figura 9. Efecto de la presión sostenida en la resistencia de la unión adhesiva en los sistemas rígido-rígido SAN/ABS.

Este comportamiento se debe al hecho de que esta presión es aplicada posterior al llenado de aproximadamente el 90% de la cavidad, por lo que el material que se encuentra en contacto con el sustrato (ABS) ya ha iniciado su solidificación. Es posible afirmar que la presión sostenida no influye de manera considerable en el nivel de adhesión final de los materiales, lo cual coincide con las conclusiones expuestas previamente por otros autores (Candal et al. 2007, 2009^a, 2009b). Es decir, el incremento de la presión sostenida no favorece la mojabilidad o reblandecimiento del sustrato, por lo que no se evidencian cambios sustanciales en los niveles de adhesión.

c) Efecto de la temperatura de inyección: se evaluó el efecto de la temperatura de inyección ya que es la variable de mayor influencia en el proceso de sobreinyección según autores previos (Rossa et al. 2009; Candal et al. 2007, 2009^a, 2009b).

Para ello se fijaron valores constantes de velocidad de inyección y de presión sostenida, variando únicamente la temperatura en 15°C desde 230 hasta 250°C, obteniendo las tendencias mostradas en la Figura 10, donde se evidencia que para que a altas temperaturas de inyección se evidencia un leve incremento de dicha resistencia.

Sin embargo, al comparar la fuerza obtenida en este caso, la cual es de aproximadamente 1 kN, con las fuerzas generadas por efecto de la velocidad de inyección 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: 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.

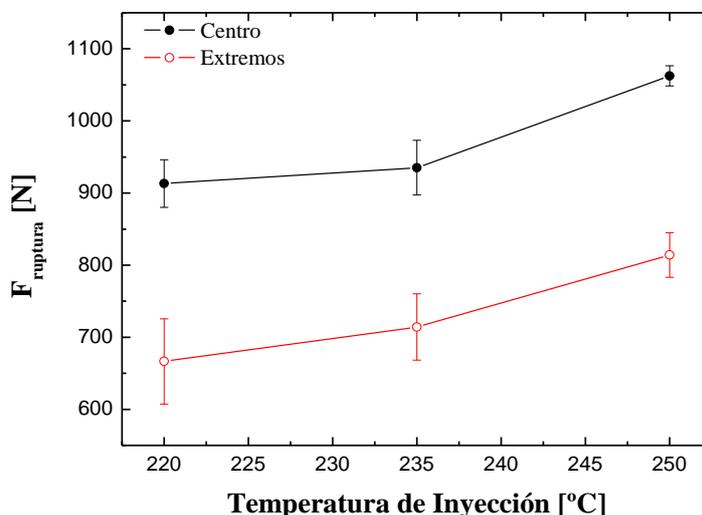


Figura 10. Efecto de la temperatura de inyección en la resistencia adhesiva para el sistema rígido-rígido SAN/ABS.

Finalmente, se observó nuevamente que, los niveles de fuerza de adherencia en el centro de la placa resultaron superiores a los observados en los laterales.

d) Efecto de la rugosidad: al evaluar el efecto de la rugosidad superficial en los niveles de adhesión en la interfase (Tabla 4), se encontró que al incrementar la porosidad superficial, mayor será la difusión molécula. Esto permite afirmar que mientras mejor se condicione la superficie de contacto (sustrato) más fácil será la movilidad de las cadenas y mayor será la penetración del polímero fundido.

En la Tabla 4 se confirma que, la rugosidad superficial favorece la adhesión interfacial en los sistemas de sobreinyección, observando niveles de fuerza adhesiva superiores para las superficies más rugosas o porosas que para las más pulidas.

Tabla 4. Relación de rugosidad y fuerza adhesiva encontrada para los sistemas rígido-rígido.

Sistema	Rugosidad mm	Fuerza de adherencia N	
		Centro	Lateral
SAN/ABS	0,8	872 ± 39	714 ± 46
	2,5	1.063 ± 14	983 ± 31

Por otro lado, el comportamiento encontrado era de esperarse, puesto que las condiciones de inyección y el punto de inyección de las placas condiciona la distribución y enfriamiento del material, motivo por el cual la pieza tardará más en enfriar en la zona central; esto permite que el tiempo de difusión de la resina sea mayor en esta zona, favoreciendo de esta manera la calidad de la adhesión.

El mecanismo desarrollado permitió obtener altas fuerzas de adhesión (superiores a 1 kN) producto de la afinidad y el anclaje desarrollado entre los materiales. Se puede afirmar que, existe una unión de los polímeros por difusión molecular. Este hecho permitió que el polímero fundido mojara y reblandeciera la superficie del sustrato, lo cual propició la difusión molecular de las cadenas, para, finalmente, formar un enredamiento molecular de ambos materiales que, al solidificar, permitió la adhesión observada en las uniones con estructura rígido-rígido, coincidiendo con los resultados planteados previamente (Candal et al. 2007, 2009a, 2009b).

Ensayos de trabajo esencial de fractura interfacial (EWIF). Partiendo de trabajos previos (Lauke y Shuller 2001; Candal et al. 2008, 2009a, 2009b, 2010), se evaluó el concepto de trabajo esencial de fractura interfacial en el sistema en estudio. Todos estos autores encontraron que dicha metodología permite medir con precisión la resistencia de la unión adhesiva alcanzada entre los materiales. Para ello se emplearon probetas DENT, ya que han sido recomendadas por diversos autores dando buenos resultados.

En cuanto a la longitud de ligamento empleada, se tiene que la misma está condicionada a ser de 3 a 5 veces mayor a su espesor pero menor a un tercio del ancho de la placa empleada. Ello debido a que, de esta manera, se garantiza, que exista un estado plano de esfuerzos, que asegura que el tamaño de la zona plástica no se vea afectada por efectos de borde laterales y que la deformación plástica ocurra justamente en el área del ligamento.

Para determinar el trabajo total de fractura interfacial en cada media placa a diferentes longitudes de ligamento, se midió el área bajo las curvas de fuerza en función del desplazamiento obtenidas al aplicar el ensayo en la máquina de ensayos universales, observándose que la carga se incrementa rápidamente a medida que ocurre el desplazamiento hasta alcanzar la fractura o separación de la interfase de los dos materiales sobreinyectados.

a) Efecto de la velocidad de inyección: al evaluar el efecto de esta variable, se observó que los resultados presentan una alta variabilidad (Figura 11), razón por la cual fue necesario eliminar ciertos puntos, con la finalidad de alcanzar un valor correlativo adecuado para validar la aplicación experimental ($R^2 > 0,99$).

Teniendo presente esta premisa, se tiene que para la menor y mayor velocidad, se obtuvo mayor pendiente (Tabla 5), es decir, se necesitó un mayor trabajo o consumo energético para vencer

la resistencia de la unión adhesiva presente en la interfase de unión, mientras que para la velocidad intermedia el consumo es menor. Este comportamiento es equivalente al obtenido en los ensayos de tracción, donde se observó la doble tendencia de la resistencia de la unión adhesiva en función de la velocidad, coincidiendo igualmente con las conclusiones observadas por otros investigadores (Candal et al. 2007, 2008). Sin embargo, a pesar del alto correlativo observado y de la clara tendencia obtenida, se tiene que el número de puntos obtenido es muy bajo para concluir acerca de la eficiencia de la metodología.

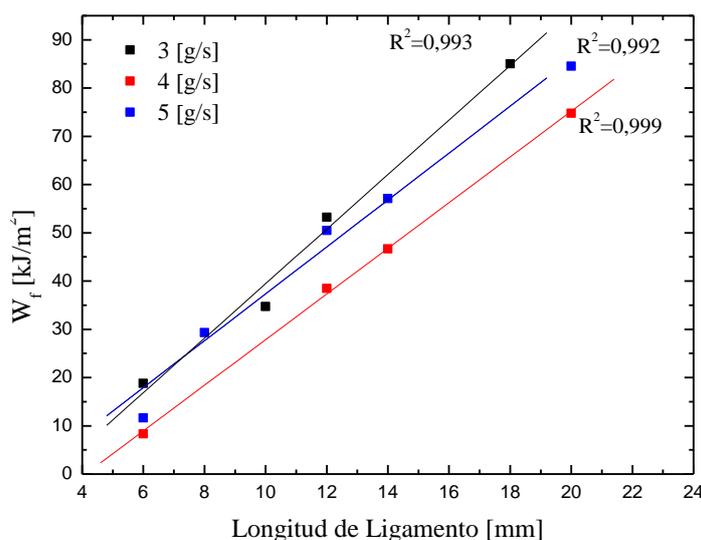


Figura 11. Efecto de la velocidad de inyección en el trabajo total interfacial de fractura (W_{IF}) en función de la longitud de ligamento para el sistema SAN/ABS en probetas tipo DENT.

Tabla 5. Relación de la pendiente en función de la velocidad de inyección.

Vinyección g/s	W_{ne} kJ/m ²	R^2
3	$5,7 \pm 0,5$	0,993
4	$4,7 \pm 0,1$	0,999
5	$5,0 \pm 0,4$	0,992

Las mismas tendencias nada claras fueron encontradas al evaluar el efecto de la temperatura de inyección y de la presión sostenida, además de la rugosidad superficial.

Ensayos de mecánica de la fractura elástico lineal interfacial (LEIFM). Ante las limitaciones encontradas al aplicar el EWIF, se propuso aplicar ensayos LEIFM, ya que es aplicable en aquellos materiales que, aunque exhiben deformaciones inelásticas en torno a la grieta, muestran un comportamiento global de tipo elástico, en el cual las deformaciones plásticas quedan confinadas

en una región muy pequeña y localizada. Así, el crecimiento o propagación de la grieta tendrá lugar cuando la energía liberada por el sistema sea igual a la empleada en la formación de las nuevas superficies de fractura creadas por la propia grieta. Este tipo de ensayo mecánico permite cuantificar la fuerza necesaria para que una grieta se propague, al igual que el EWIF, pero minimizando el error presente debido al alto espesor de las placas diseñadas.

Una vez diseñadas las probetas en función del espesor, se procedió a realizar pruebas previas con el sistema SAN/ABS. Se entallaron probetas con las dimensiones adecuadas y se sometieron a un ensayo de flexión en tres puntos, a una velocidad de desplazamiento de 1 mm/min, velocidad recomendada por el protocolo usado, obteniendo el comportamiento mostrado en la Figura 12.

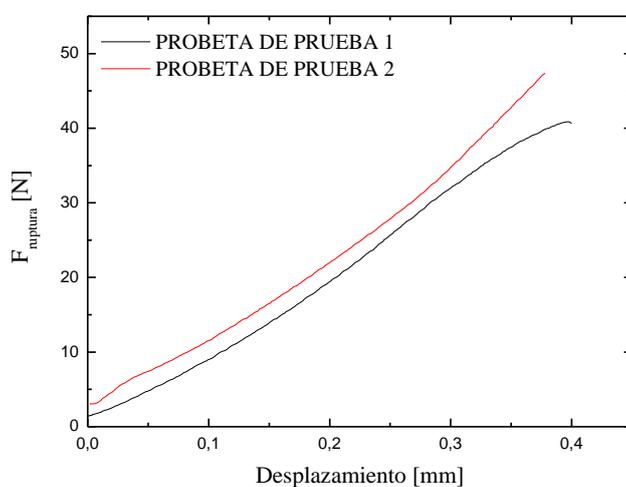


Figura 12. Curva fuerza adhesiva en función del desplazamiento para el sistema SAN/ABS sometido a ensayos de LEIFM.

Al observar las curvas obtenidas, se determinó si el protocolo era aplicable a la estructura sobreinyectada propuesta. Se verificó si las fuerzas y pendientes obtenidas cumplían con dichos requerimientos, es decir, que la $F_{5\%}$ fuese menor a la $F_{m\acute{a}x}$ de fractura obtenida. La $F_{5\%}$ corresponde al punto de corte de la curva a un ángulo $\theta + 5\%$. Una vez hechos los cálculos correspondientes, se verificó que el SAN/ABS satisface las condiciones, lo cual era de esperarse basados en las investigaciones llevadas a cabo (Grein et al. 2003).

Así, se procedió a evaluar el efecto de las condiciones de proceso con la condición óptima (Condición H5), la cual fue determinada previamente a partir de los resultados encontrados a través de los ensayos de tracción.

Se procedió a entallar cada probeta haciendo uso de un exacto u hojilla manteniendo la profundidad de entalla establecida; obteniendo de esta manera, la respuesta mostrada en la Figura 13, donde se evidencia que dichos resultados no se ajustan a los requerimientos expuestos anteriormente, debido a que las curvas carecen de linealidad, lo que sugiere que existe una

deficiencia en la metodología de entalla a la que se sometió la probeta. De esta forma, es posible afirmar que la grieta se propagó por uno u otro material, o que inclusive pasó de un material a otro en su recorrido.

Posteriormente se mejoró la técnica con la finalidad de minimizar el error; se propuso modificar la metodología de entalla, proponiendo entallar las probetas usando un exacto u hojilla sometida previamente a altas temperatura, lo cual podría minimizar el error asociado a formación de micro grietas o de concentración de esfuerzos producto del roce entre el exacto y el material sometido a corte, obteniendo la respuesta mostrada en la Figura 14, donde fue posible suavizar las curvas; sin embargo, no cumple con el protocolo, por lo que no fue posible extraer mayor información.

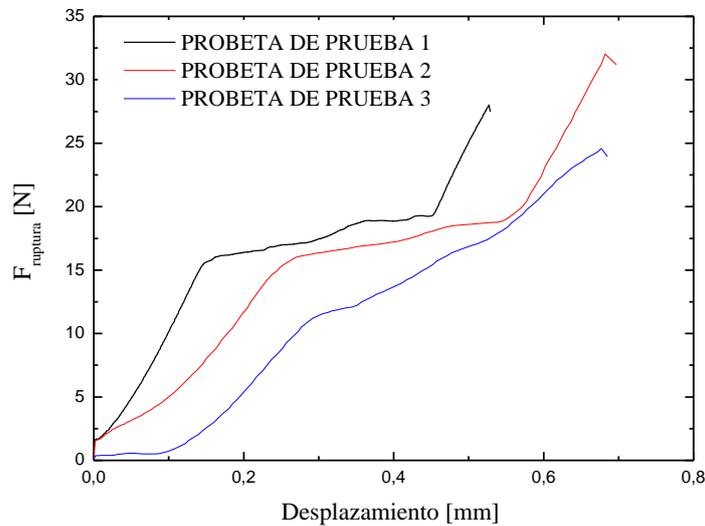


Figura 13. Curva fuerza–desplazamiento para el sistema SAN/ABS sometido a ensayos de LEIFM entalladas con un exacto para la condición H5.

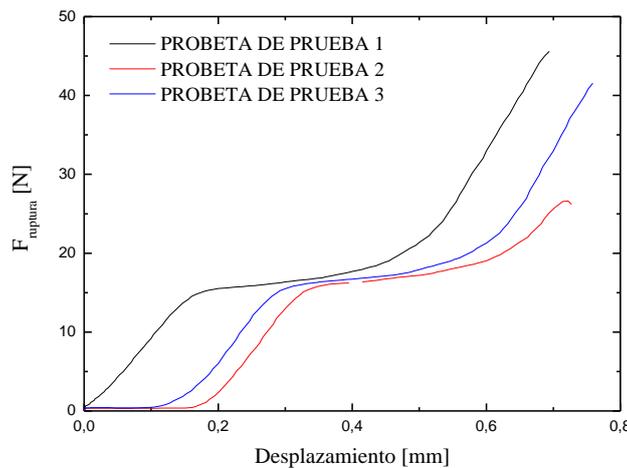


Figura 14. Curva fuerza–desplazamiento para el sistema SAN/ABS sometido a ensayos de LEIFM entalladas con un exacto caliente para la condición H5.

CONCLUSIONES

- El principal mecanismo de adhesión interfacial observado en uniones rígido/rígido ABS/SAN fue la difusión molecular.
- Al evaluar el sistema rígido-rígido ABS/SAN se evidenciaron fallas de tipo mixta.
- El incremento de la temperatura de inyección aumenta la adhesión interfacial en el sistema ABS/SAN.
- El efecto de la presión sostenida en la resistencia de la unión adhesiva de los sistemas de sobre-inyección evaluados presentó una doble tendencia con el incremento de la misma.
- La velocidad de inyección evidencia una doble tendencia, con el incremento de la misma
- Al incrementar la rugosidad de la unión adhesiva ABS/SAN se observa que ocurre un mayor anclaje mecánico entre los materiales que incrementa la adhesión.
- Los sistemas formados por uniones rígido-rígido, manifestaron elevados niveles de resistencia de la unión adhesiva comparados con sistemas estudiados previamente, como los sistemas rígido-suave.
- Se encontró que la mejor metodología para evaluar la resistencia de la unión adhesiva en un sistema rígido-rígido es el ensayo de tracción.

BIBLIOGRAFÍA

- AVERY J "Injection molding alternatives. A guide for designers and product engineers". Hanser Publishers, Munich 1998
- BEAUMONT J, SHERMAN R, NAGEL R "Successful Injection Molding: Process, Design, and Simulation". Hanser Publishers, Munich 2002
- CANDAL M, GORDILLO A, TERIFE G, SANTANA O "Effect of the process conditions over the adhesion between two overmolded polymers". SPE's ANTEC Proceedings 2007
- CANDAL M, GORDILLO A, SANTANA O, SÁNCHEZ J "Study of adhesion strength on overmoulded plastic materials using the essential work of interfacial fracture (EWIF) concept", *J. Materials Sci.*, **43(15)**, 5052 (2008)
- CANDAL M, MÉNDEZ 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
- Clutton E "Essential work of fracture, en *Fracture Mechanics Testing Methods for Polymers Adhesives and Composites*", Moore DR, Pavan A, Williams JG (editores) pp. 177-195,ESIS Publication 28, Elsevier, Amsterdam 2001
- FOURCHE G "An overview of the basic aspects of polymer adhesion. Part I. Fundamentals", *Polymer Engineer and Science*, **35(12)**, 957 (1995)
- GREIN C, KAUSCH H, BÉGUELIN PH "Characterisation of toughened polymers by LEFM using an experimental determination of the plastic zone correction", *Polymer Testing*, **22(7)**, 733 (2003)
- LAUKE B, SCHÜLLER T "Essencial Work of Interfacial Fracture: A Method to Characterize Adhesion at Polymer-Polymer Interfaces", *International J. Adhesion & Adhesives*, **21(55)**, 55 (2001)
- LIU XF, LIU QY, WU HG WANG "Effect of surface modifications and environmental the interfacial adhesion of polymer/aluminum alloy", *Materials Science and Engineering*, **483-484**, 683 (2008)
- MARTÍNEZ M "Adhesión y uniones adhesivas". CYTED, Universidad de Alicante, Alicante 1998
- POCIUS A "Adhesion and adhesives Technology. An introduction". Hanser Publishers, Munich 2002
- ROSSA A, SANCHEZ-SOTO M ILLESCAS S, MASPOCH ML "Study of the interface behavior between MABS/TPU bilayer obtained", *Materials & Design*, **30**, 3979 (2009)

WENG D, ANDRIES J, MORIN P, SAUNDERS K, POLITIS J “Fundamentals and Material Development for thermoplastic Elastomer (TPE) Overmolding”, *J. Injection Molding Technology*, **4 (1)**, 22 (2000)
WU S “Polymer Interphase and Adhesion”. Marcel Dekker Inc., New York 1982