

Evaluación del trabajo de adhesión termodinámico en placas de acero AISI 4140 y pistas de rodamiento utilizando adhesivos anaeróbicos

Germán García^{a,}, Herley Casanova^b, Pedronel Araque^b, Alejandro Toro^a*

^aGrupo de Tribología y Superficies, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

^bGrupo de Coloides, Instituto de Química, Universidad de Antioquia, Medellín.

(Recibido el 21 de octubre de 2005. Aceptado el 8 de noviembre de 2005)

Resumen

Se evaluó el trabajo de adhesión termodinámico de placas planas de acero (AISI 4140 y AISI 52100) en contacto con dos adhesivos anaeróbicos de uso comercial, mediante la medición de los ángulos de contacto termodinámico de avance y retroceso obtenidos por el método de inmersión y emersión. Se utilizó el método de van Oss para calcular las componentes polares y no polares de adhesión para cada par metal-adhesivo. Se analizó también el efecto de la aplicación de un activador de superficie sobre el trabajo de adhesión en húmedo y se relacionaron los resultados con las características químicas y físicas de las placas. Los resultados indicaron que la aplicación del activador tuvo un efecto importante sobre la mojabilidad de los adhesivos, pero pequeña influencia en el trabajo de adhesión medido. Por otro lado, se encontraron diferencias importantes en la respuesta de los dos adhesivos estudiados, fundamentalmente en virtud de su composición química y propiedades reológicas.

----- *Palabras clave:* trabajo de adhesión, ángulo de contacto, energía libre de superficie, adhesivo anaeróbico, activador de superficie.

Assesment of thermodynamic adhesion work on AISI 4140 steel plates and rolling bearing liners with anaerobic adhesives

Abstract

The thermodynamic adhesion work of AISI 4140 flat plates and AISI 52100 steels in contact with two commercial anaerobic adhesives was evaluated by measuring

* Autor de correspondencia: teléfono: +57+4+430 92 60, fax: +57+4+260 65 19, correo electrónico: glgarcia@unal.edu.co (G. L García M.)

the advancing and receding contact angles in an immersion-emersion tensiometer. The polar and non-polar adhesive components were calculated by the van Oss method for all the adhesive-metal pairs tested. The effect of the application of a *primer* on the metal surface was also considered. The results showed that application of the primer had a significant effect on the wettability of adhesives, although the adhesion work remained practically unchanged with respect to the pure adhesive-metal joints. On the other hand, major differences on the response of the two commercial were observed between the two commercial adhesives studied, mainly as a consequence of their chemical composition and rheological properties.

Key words: adhesion work, contact angle, surface free energy, anaerobic adhesive, primer.

Introducción

En nuestro medio es común que en muchas aplicaciones la selección de adhesivos industriales se lleve a cabo a partir de criterios empíricos, pues generalmente se desconocen los mecanismos superficiales, interfaciales, y las variables que afectan la adhesión, la cohesión y las propiedades mecánicas esperadas de una junta adhesiva. No se hace, en general, una caracterización de propiedades como la resistencia al corte por tracción, por torsión pura, por rasgado (*peeling*), ni tampoco de la geometría e integridad de las superficies, o de las características físicas y químicas de los materiales de la junta, entre otras.

La situación es aún más compleja si se tiene en cuenta que en la información reportada en la literatura, se presentan gran número de ensayos (pruebas destructivas y no destructivas) para evaluar el comportamiento de las juntas adhesivas, pero los resultados presentan altos índices de dispersión. Algunas investigaciones recientes confirman que los parámetros superficiales y los mecanismos que influyen en la resistencia de una unión adhesiva son aplicables a casos particulares, y no ha sido reportado hasta el momento un modelo general que relacione estos parámetros con el comportamiento mecánico de las juntas [1].

El presente trabajo muestra los resultados de las mediciones del trabajo de adhesión termodinámico en una unión compuesta por un material utilizado para la fabricación de ejes de transmisión en sistemas mecánicos (acero AISI 4140), un acero AISI 52100 utilizado en la fabricación de anillos para rodamientos comerciales y dos adhesivos comerciales para juntas metal-metal. Se utiliza la teoría propuesta por Van Oss y Good (vOGT), [2], cuyo principio de aplicación se fundamenta en el cálculo de las componentes ácido-base de la energía libre de superficie (ELS), necesarias para evaluar el trabajo de adhesión termodinámico de cada acero cuando entra en contacto con cada uno de los adhesivos líquidos comerciales (referencias A y B) con la presencia de activadores

de superficie recomendados por el fabricante de estos últimos o sin ellos. Este método ha sido ampliamente discutido por Della Volpe, y otros investigadores en diferentes trabajos [3, 4].

Se utiliza este método para evaluar el trabajo de adhesión termodinámico producto de la interacción molecular de las superficies porque suministra información experimental relacionada con la compactibilidad física y química de los adhesivos líquidos con los sustratos de acero al entrar ambos en contacto directo. La información hace referencia a las características químicas de ambos materiales manifestadas por el cálculo de la componente polar ácida (γ^+), la polar básica (γ^-), y la no polar o dispersiva (γ^{LW}) de la tensión superficial, y las características físicas representadas por los ángulos de contacto de avance reales entre las placas sólidas (θ) en contacto con los adhesivos líquidos y con los líquidos patrones reportados en la literatura. Este método supone que las componentes polares (ácido y básico) de la tensión superficial del agua son iguales [5]. Por otro lado, la evaluación de la energía superficial de los sólidos ha sido objeto de estudio profundos en los últimos 10 años [4].

Desarrollo experimental

Cálculo de la energía libre de superficie (ELS) para dos aceros comerciales

Se seleccionaron dos aceros comerciales, nominalmente AISI 4140 y AISI 52100. El primero es un acero de construcción mecánica de amplia utilización en sistemas de transmisión de potencia (para fabricación de ejes, por ejemplo), y el segundo es reconocido por su buen desempeño en rodamientos. Las tablas 1 y 2 presentan la composición química de los aceros, medida por el método de espectrometría de emisión óptica.

Se empleó el método de Van Oss (vOGT) para calcular las componentes polares ácido, base y no polar o dispersiva de las superficies, de acuerdo con los datos reportados en la literatura [5].

Tabla 1 Composición porcentual por peso de elementos presentes en el acero AISI 4140

%C	%Si	%Mn	%S	%P	%Ni	%Cr	%Mo	%Al	%Cu	%Pb	%Sn	%Ti	%V
0,403	0,360	0,782	0,014	0,030	0,147	1,259	0,179	0,004	0,245	0,008	0,022	0,001	0,018

Tabla 2 Composición porcentual por peso de elementos presentes en el acero AISI 52100

%C	%Si	%Mn	%S	%P	%Ni	%Cr	%Mo	%Al	%Cu	%Pb	%Sn	%Ti	%V
0,964	0,249	0,366	0,014	0,018	0,062	1,514	0,019	0,006	0,108	0,002	0,012	0,002	0,008

Se partió de líquidos patrones conocidos que tienen definidas sus diferentes componentes polares (ácido γ^+ , base γ^-) y la componente no polar o dispersiva (γ^{LW}), y por consiguiente el valor de la tensión total de superficie (γ^{Tot}). El método requiere utilizar una tripleta de líquidos patrones que cumplan al menos las siguientes condiciones:

un líquido dispersivo, uno de preferencia ácida y otro de preferencia básica. En este proyecto se utilizaron los cinco líquidos reportados en la tabla 3 para una mayor confiabilidad en los resultados, y para cada uno se midió el ángulo de contacto de avance usando un equipo Krüss referencia K12.

Tabla 3 Valores de las componentes dispersivas, ácido y base de la tensión superficial para los líquidos patrones a 20 °C en mN/m utilizados [5].

Líquido patrón	γ^{Tot}	γ^{LW}	γ^{ab}	γ^+	γ^-
Agua (H ₂ O)	72,80	21,90	51,00	25,50	25,50
Glicerol (C ₃ H ₈ O ₃)	64,00	34,00	30,00	3,92	57,40
Formamida (CH ₃ NO)	58,00	39,00	19,60	2,28	39,60
Diyodometano (CH ₂ I ₂)	50,80	50,80	0,00	0,00	0,00
Etilenglicol (C ₂ H ₆ O ₂)	47,99	29,00	18,99	1,92	47,00

En la figura 1 se observa la forma como entran en contacto directo las placas con los diferentes líquidos patrones para la medición de los respectivos ángulos de contacto de avance (θ), obtenidos durante el proceso de inmersión, en el tensiómetro (K12), de inmersión y emersión de placas estándar en líquidos patrones. Para cada acero, las mediciones se realizaron con aplicación de un activador de superficie comer-

cial sobre las placas y sin él, con el propósito de evaluar esta práctica de preparación de las superficies, la cual se usa intensivamente en aplicaciones cotidianas.

Good and Van Oss han propuesto una ecuación que considera tres componentes desconocidas de la tensión de los sólidos: componente dispersiva, (γ_s^{LW}), polar negativa o básica (γ_s^-), y polar posi-

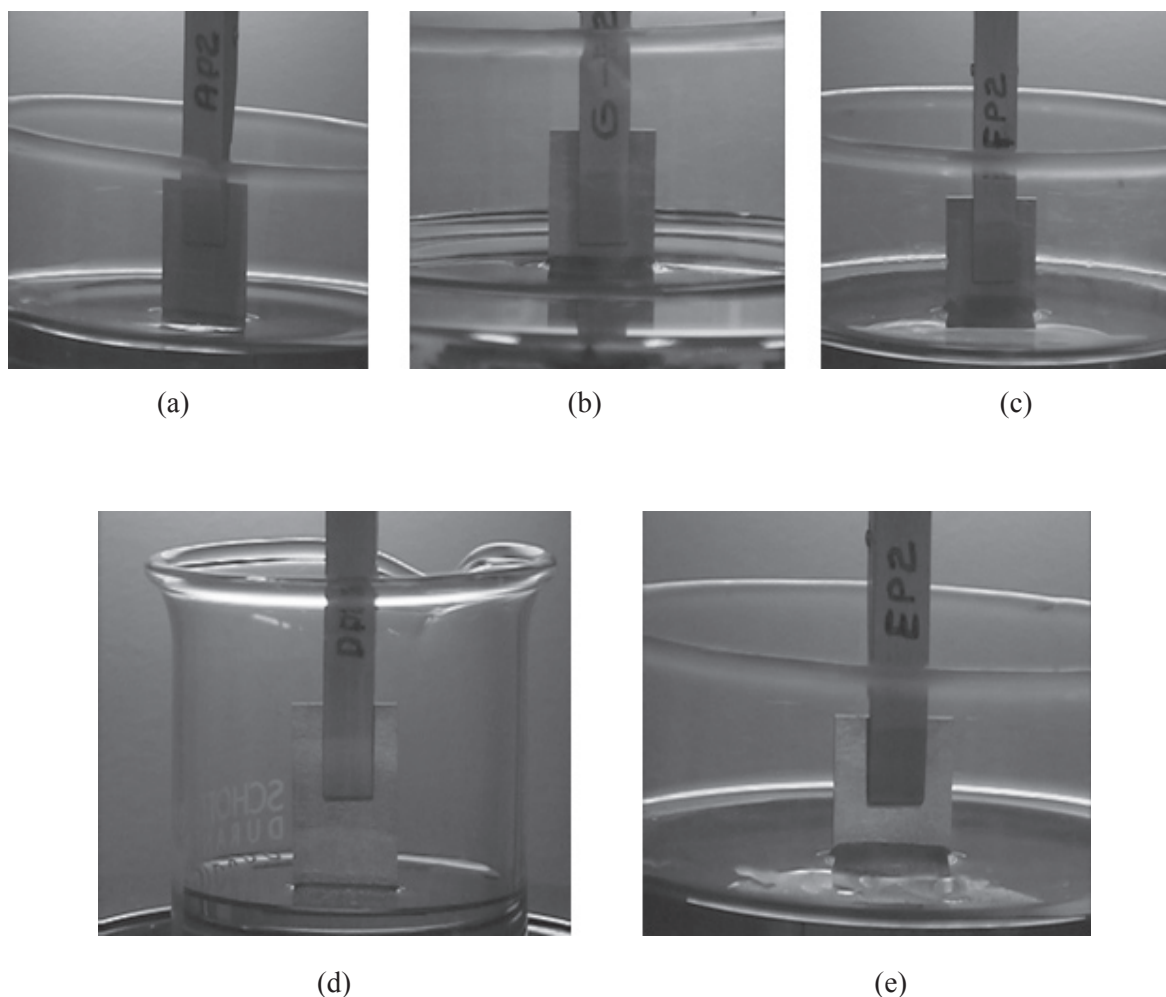


Figura 1 Ilustración del contacto superficial de una placa de acero con los diferentes líquidos patrones en el tensiómetro de superficie: (a) Agua; (b) glicerina; (c) formamida; (d) diyodometano; (e) etilenglicol. La prueba se realiza con los mismos parámetros de velocidad y longitud de inmersión y emersión para cada placa. Puede observarse, que la afinidad de la placa con cada líquido es diferente y esto se aprecia en el menisco que se forma durante el contacto

tiva o ácida (γ_s^+). Las componentes de la energía libre de superficie de los líquidos patrones utili-

zados se representan por: $\gamma_{l,i}^{Tot}$, $\gamma_{l,i}^{LW}$, $\gamma_{l,i}^+$, $\gamma_{l,i}^-$. La ecuación 1 ilustra estas variables:

$$\gamma_{Li}^{Tot} (1 + \cos \theta_i) = 2 \left[(\gamma_{Li}^{LW} \gamma_s^{LW})^{\frac{1}{2}} + (\gamma_{Li}^+ \gamma_s^-)^{\frac{1}{2}} + (\gamma_{Li}^- \gamma_s^+)^{\frac{1}{2}} \right], i = 1, 2, 3, \quad (1)$$

Con los valores de las tres componentes de tensión superficial o energía libre de superficie (ELS), obtenidos al resolver este sistema de

ecuaciones lineales, se procedió a calcular la componente de tensión superficial total (γ_s^{Tot}), de acuerdo con la ecuación 2.

$$\gamma_s^{Tot} = \gamma_s^{LW} + 2(\gamma_s^+ \gamma_s^-)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Cálculo de la energía libre de superficie (ELS) para los adhesivos líquidos

Con los sólidos previamente caracterizados, se procede a identificar las correspondientes componentes de la energía libre de superficie para dos adhesivos comerciales comúnmente utilizados para aplicaciones en juntas metal-metal sometidas a sollicitaciones en torsión. En este proyecto, los adhesivos se identifican como tipo A y tipo B. El

procedimiento para el cálculo de la ELS se describe a continuación:

- Medición del ángulo de contacto de avance para la interacción adhesivo y placa sólida previamente caracterizada: para el caso particular se emplean placas sólidas de teflón, vidrio y las placas de acero AISI 4140 y AISI 52100.
- Cálculo de las componentes de la ELS en los adhesivos. Las ecuaciones utilizadas en este caso son las mismas que para los aceros, de manera que la ecuación 1 puede reescribirse:

$$\gamma_{adh}^{Tot} (1 + \cos \theta_j) = 2 \left[(\gamma_{adh}^{LW} \gamma_{s,j}^{LW})^{\frac{1}{2}} + (\gamma_{adh}^+ \gamma_{s,j}^-)^{\frac{1}{2}} + (\gamma_{adh}^- \gamma_{s,j}^+)^{\frac{1}{2}} \right], j = 1, 2, 3, \quad (3)$$

En forma similar a las placas de acero, se procede a calcular los respectivos valores de tensión total del adhesivo, según la ecuación 4.

$$\gamma_{adh}^{Tot} = \gamma_{adh}^{LW} + 2(\gamma_{adh}^+ \gamma_{adh}^-)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Cálculo de la tensión total (γ_{adh}^{Tot}) del adhesivo líquido por anillo de Du Nouy

En el tensiómetro de inmersión y emersión de placas sólidas, K12, se hace uso del método del anillo de Du Nouy [6] para calcular con precisión la tensión superficial del adhesivo (γ_{adh}^{Tot}), la cual se utiliza en la ecuación 3 y se compara con el obtenido en la ecuación 4.

El procedimiento consiste en:

- Inmersión del anillo estándar de Du Nouy (anillo de platino) en el adhesivo líquido (3 mm).
- Halado lento del anillo hacia afuera a una velocidad constante (3 mm/min).
- Se registra la fuerza promedio máxima (de 10 valores en mN), que es capaz de romper la película formada alrededor del anillo en presencia de la fase de vapor.

En la figura 2, se ilustran las etapas de inmersión y emersión del anillo de Du Nouy en el proceso de medición de la tensión superficial de un adhesivo.

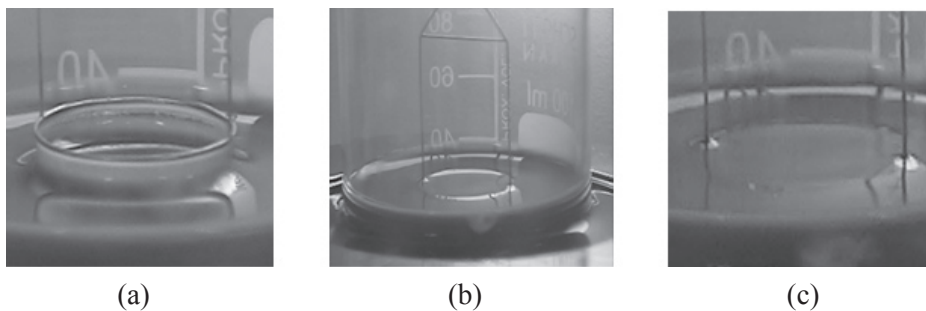


Figura 2 Etapas de inmersión y emersión lenta del anillo de Du Nouy durante el proceso de medición de la tensión superficial de un adhesivo. (a) Movimiento vertical hacia arriba en la emersión, (b) inicio del proceso de inmersión hacia abajo, (c) terminación del proceso de inmersión

Cálculo del trabajo de adhesión termodinámico (W_a)

Finalmente, para el cálculo del trabajo de adhesión termodinámico (W_a) se empleó la ecuación

$$W_a = 2 \left[\left(\gamma_{adh}^{LW} \gamma_s^{LW} \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\gamma_{adh}^+ \gamma_s^- \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\gamma_{adh}^- \gamma_s^+ \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (5)$$

Resultados y discusión

Ángulos de avance sobre placas de referencia (teflón, vidrio), acero AISI 4140, acero SAE 52100 con activador en contacto con líquidos patrones y sin él

En la tabla 4 se reportan los diferentes ángulos de avance cuando entran en contacto directo los líquidos patrones con las placas sólidas y placas de acero con componentes de tensión superficial desconocidas.

Puede notarse que los sustratos de acero SAE 4140 y AISI 52100 cuando fueron impregnados con activadores de superficie disminuyeron en algunos casos, significativamente, sus ángulos de contacto, y más aún, llegaron a valores muy similares entre sí. Esto permite afirmar en primera instancia que las características termodinámicas de las superficies después de la aplicación del activador tienden a ser parecidas, aunque sus composiciones químicas iniciales y tratamientos térmicos sean bastante diferentes.

En la figura 3, se presenta la curva característica de fuerza de mojado en el proceso de inmersión y emersión para el acero AISI 52100 sin activador. De manera rápida puede visualizarse al final de la inmersión que mientras más cercanas estén las curvas entre sí (salto mínimo), las pendientes de las curvas, tanto en la posición de inmersión como de emersión, son más pequeñas y como consecuencia de ello también los ángulos de contacto en avance y retroceso. Combinando este comportamiento de la placa SAE 52100 sin activador con los datos de la tabla 4, se obtiene el

5 que relaciona los seis parámetros de interacción entre las placas sólidas de acero AISI 4140, AISI 52100 al entrar en contacto con los adhesivos líquidos.

menor ángulo de contacto con el líquido patrón etilenglicol cuyo valor es de 33,40°, seguido por la formamida con un ángulo de contacto de avance de 36,90°.

En la figura 4 se muestra el comportamiento de la placa de acero AISI 4140 cuando entra en contacto con los líquidos patrones sin activador, y nuevamente, si se combina este comportamiento con los datos de la tabla 4, se encuentra que el mejor ángulo de contacto de avance se obtiene para el etilenglicol con un valor de 44,45°, seguido de la formamida con un valor de 56,50°.

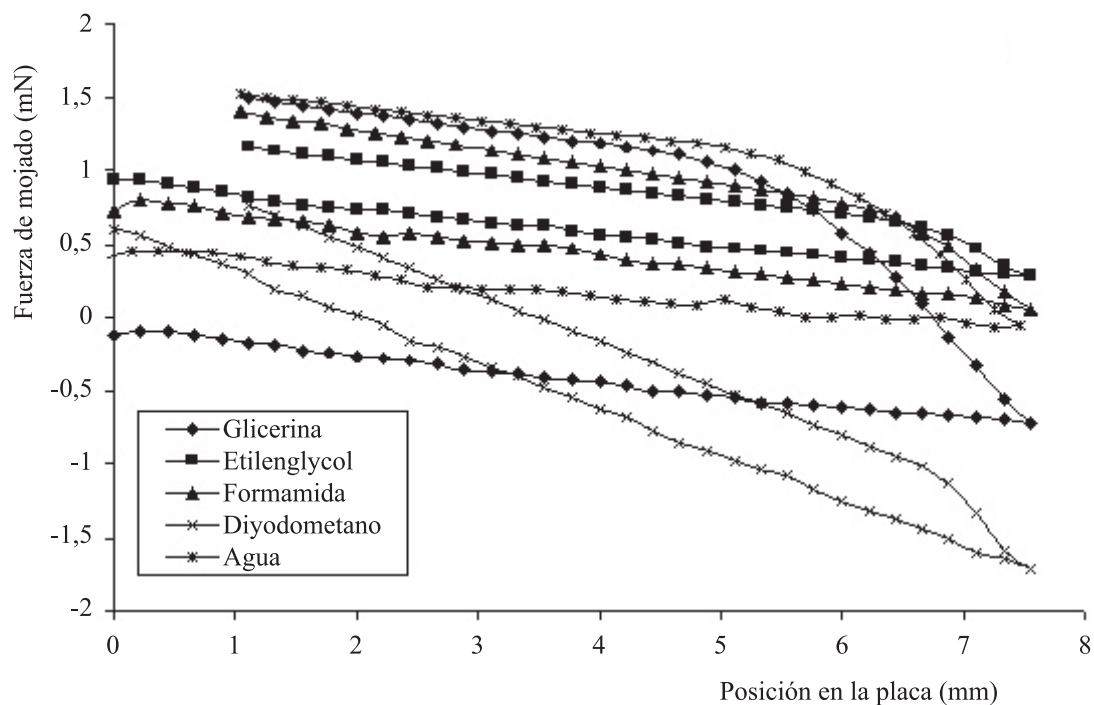
Ángulos de avance para placas de acero AISI 4140, AISI 52100 y placas sólidas en contacto con los adhesivos

En la tabla 5 se reportan los ángulos de contacto para las diferentes placas sólidas interactuando con los adhesivos líquidos. Se encuentra que la mojabilidad en las placas de acero mejora cuando son expuestas a la acción de los activadores de superficie. En este caso el efecto logrado por el activador para los dos sustratos estudiados fue prácticamente el mismo: la reducción significativa del ángulo de contacto a valores muy similares entre sí.

Si se hace un análisis comparativo para un mismo adhesivo sin activador y sin él, puede notarse que la diferencia en los ángulos de contacto obtenidos en cada caso, no es significativa, pero si se compara la interacción del adhesivo tipo B con la del adhesivo tipo A para los mismos sustratos, se nota que el ángulo de contacto para el adhesivo tipo B está más cerca de cero

Tabla 4 Ángulos de contacto de avance entre placas sólidas y líquidos patrones (°)

Líquidos Patrones	Placas sólidas de referencia		Substratos de acero sin activador		Substratos de acero con activador	
	Teflón	Vidrio	AISI 4140 Ra 0,65	AISI 52100 Ra 0,31	AISI 4140 Ra 0,65	AISI 52100 Ra 0,31
	Glicerol C ₃ H ₈ O ₃	92,55	29,70	75,25	91,50	66,05
Etilenglicol C ₂ H ₆ O ₂	78,40	15,40	33,40	44,45	27,45	33,45
Formamida CH ₃ NO	84,90	14,85	36,90	56,50	37,45	41,25
Diyodometano CH ₂ I ₂	81,05	50,10	57,85	61,65	32,55	34,90
Agua H ₂ O	105,80	14,65	59,65	73,95	58,90	70,70

**Figura 3** Ángulos de contacto de avance para el sustrato AISI 52100 sin activador en presencia de diferentes líquidos patrones

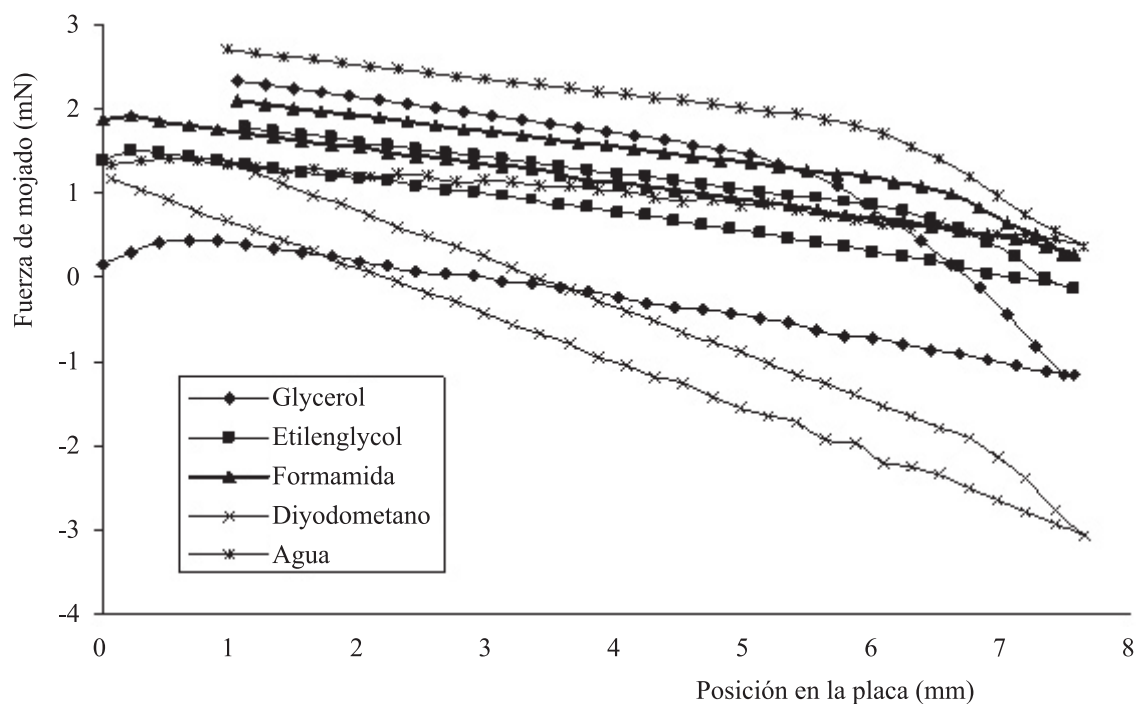


Figura 4 Ángulos de contacto de avance para el sustrato AISI 4140 sin activador en presencia de diferentes líquidos patrones. En el eje X se representa la longitud de inmersión y emersión de la placa, y en las ordenadas se representa la fuerza dinámica registrada en el tensiómetro de superficie

Tabla 5 Ángulos de contacto producto de la interacción placas sólidas/adhesivos (°)

Tipo de adhesivo	Placas sin activador		Placas con activador		Placas de referencia	
	AISI 4140 Ra 0,65	AISI 52100 Ra 0,31	AISI 4140 Ra 0,65	AISI 52100 Ra 0,31	Teflón	Vidrio
A	72,80	74,60	63,80	60,70	80,40	49,60
B	46,20	48,90	21,70	21,20	69,25	30,00

y por consiguiente se podría esperar una mejor compatibilidad de éste con los sustratos de acero, además se reporta comercialmente que el adhesivo tipo B tiene menor viscosidad (alrededor de 3,5 veces menor que el tipo A, por consiguiente se espera que exhiba mejor comportamiento al mojado de los sustratos de acero cuando haga el contacto físico.

Componentes polares y no polares de la energía libre de superficie (ELS)

En la tabla 6 se reportan los valores de las componentes polares (ácida y básica) y no polar (dispersiva) de la tensión superficial para las placas de acero y placas de referencia utilizadas. La diferencia fundamental que se obtiene en los

substratos de acero sin activador, radica en la variación de la componente polar básica, debido a las diferencias que se tienen en la composición química reportadas en las tablas 1 y 2. Estas diferencias de composición química pueden provocar

algún efecto de inducción de dipolos permanentes [7]. Para esta misma condición (sin activador), las diferencias encontradas en la componente de dispersión (γ^{LW}) de la energía libre de superficie no son significativas.

Tabla 6 Componentes polares y no polares de la energía libre de superficie (ELS) en las placas de acero AISI 4140, AISI 52100 y adhesivos tipo A y tipo B en mN/m

Componentes de la ELS	Placas de referencia		Substratos de acero sin activador		Substratos de acero con activador		Tipo de adhesivo	
	Teflón	Vidrio	AISI 4140	AISI 52100	AISI 4140	AISI 52100	A	B
LW (γ^{LW})	16,9	34,5	31,6	29,1	44,1	42,7	6,4	7,1
Básico (γ^-)	0,4	58,2	23,9	15,1	20,5	8,6	11,2	7,3
Ácido (γ^+)	0,6	1,3	0,4	0,0	0,0	0,3	9,4	20,7
Total (γ^{Tot})	17,9	52,1	37,9	30,3	45,7	46,0	27,0	31,6

Para la situación de los substratos con activador, el efecto final que produce este es equilibrar la energía libre de superficie total de los dos substratos, pero al igual que en la situación anterior hay una diferencia notoria en la componente polar básica.

Los resultados para los substratos de acero también reportan que la componente polar ácida (γ^+), es prácticamente nula y por consiguiente no afecta de ninguna manera el proceso de mojado, ni tampoco el cálculo de la tensión total de energía libre de superficie (γ^{Tot}).

Los adhesivos entre sí presentan algunas diferencias en las componentes polares ácida y básica y esto probablemente es debido a las diferentes formulaciones químicas que exhiben. En general, en forma comparativa, se cumple el siguiente planteamiento para los adhesivos: mientras en el adhesivo tipo B disminuye su componente básica en 45 % aproximadamente, con relación al tipo A, se incrementa el valor de la componente ácida en 55 % aproximadamente, de tal manera que el

efecto final sobre su energía libre total de superficie supera en 15 % aproximadamente la energía libre total de superficie al adhesivo tipo A.

Trabajo de adhesión termodinámico (W_a) para la interacción de placas AISI 4140 y AISI 52100 con adhesivos tipos A y B

En la tabla 7 se reportan los valores del trabajo de adhesión termodinámico obtenidos mediante la solución de la ecuación 5.

Se observa que el efecto del activador sobre el trabajo termodinámico de adhesión (W_a) para cada una de las interacciones sustrato/adhesivo es prácticamente nulo y la función básica que desempeña el activador es simplemente la de facilitar el mojado de la superficie del sustrato.

Si se relacionan los datos obtenidos en la tabla 6 con los obtenidos en la tabla 7, se destaca que los adhesivos tipos A y B tienden a ser más polares que dispersivos, mientras que los substratos de acero son más dispersivos que polares. Luego,

Tabla 7 Trabajo de adhesión termodinámico (W_a), en mN/m para la interacción sustrato/adhesivo tipos A y B, con activador y sin él

<i>Material del Sustrato</i>	<i>Interacción sustrato/adhesivo sin activador</i>		<i>Interacción sustrato/adhesivo con activador</i>	
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>B</i>
AISI 4140	62,90	77,90	62,70	77,50
AISI 52100	52,30	64,91	54,90	64,50

al aplicarles el activador a estos últimos, incrementan su dispersión pero disminuyen su polaridad, produciendo un efecto equilibrado sobre la energía libre superficial total del sustrato, lo cual conduce a afirmar que el activador tiende a ser también más dispersivo y menos polar, dando como resultado final el no incremento del valor en el trabajo de adhesión.

Luego puede confirmarse que este tipo de sustratos estudiados (acero AISI 4140 y AISI 52100) no requieren este tipo de activadores y muy probablemente para mejorar el proceso de adhesión termodinámico, aparte de cambiar el activador por otro que maximice la adhesividad, es necesario modificar sus características físicas superficiales como rugosidad y demás parámetros de superficie, así como su composición química en términos por ejemplo de un tratamiento de superficie, entre otros aspectos. Es claro que no se puede estudiar separadamente el efecto que produce una variación en el ángulo de contacto sin antes identificar los cambios que surjan en el sistema de adhesión producto de otras interacciones de superficie debidas por ejemplo a la variación del estado físico de las superficies en contacto, la naturaleza química de la misma, las propiedades físicas y químicas de los adhesivos, la utilización o no de activadores de superficie, la cinética de la reacción, la limpieza de las superficies, entre otras.

Cualquier cambio relacionado con una de estas variables incide de manera diferente en las componentes polares y no polares de la energía libre de superficie y por consiguiente afectará

al trabajo de adhesión que en última instancia está relacionado con las fuerzas de contacto intermoleculares presentes en las superficies de unión (intercaras).

Tensión total (γ_{adh}^{Tot}) de los adhesivos tipos A y B realizada con el anillo de Du Nouy

En la tabla 8 se reporta el valor de la tensión total del adhesivo (γ_{adh}^{Tot}), obtenida por el método del anillo estándar de Du Nouy.

Tabla 8 Valores de la tensión total del adhesivo calculada por el método de Du Nouy en (mN/m)

Tipo de adhesivo	Densidad (g/ml)	γ_{adh}^{Tot} (mN/m)
A	1,16	36,80
B	1,13	36,08

Con el método del anillo de Du Nouy, se aprecia que estos valores no tienen diferencia significativa entre ellos, pero si se comparan con los obtenidos por el método de VOGT, las diferencias comparativas son del 27 y 13% para los adhesivos tipos A y B respectivamente, lo que cuestiona de alguna forma la suposición de los valores parciales de las componentes polares (ácida, γ^+ y básica, γ^-) asumidas para el agua por Van Oss and Good, las cuales son de 25,5 mN/m, mientras que en la literatura Della Volpe, C., Siboni, S, [4], reportan para el agua diferentes valores: $\gamma_{agua}^+ = 65.5$ mN/m y $\gamma_{agua}^- = 10,0$ mN/m, que incide finalmente en los cálculos de las componentes de ELS para los sólidos.

Conclusiones y recomendaciones

- En los aceros AISI 4140 y AISI 52100, el efecto del activador sobre el trabajo de adhesión termodinámico (W_a) es nulo, lo que quiere decir que el activador no aporta resistencia mecánica a la unión, pero sí mejora significativamente las condiciones de mojabilidad de los substratos, garantizando que el adhesivo se pueda esparcir con facilidad sobre las superficies de unión.
- Comparativamente, en forma matemática, puede afirmarse que el activador afecta positivamente las componentes dispersivas de las placas metálicas de acero, incrementando su valor inicial (sin activador), pero de forma inversa afecta también las componentes polares (ácida y básica), disminuyendo su valor, en una proporción tal que la suma cuadrática de las raíces de las componentes de la ELS representadas en la ecuación 5 no alteran el efecto final del trabajo de adhesión.
- El adhesivo tipo B es el que mejor comportamiento presenta en las diferentes interacciones (adhesivo/placa), tanto con activador para ambos substratos y sin él (AISI 4140 y AISI 52100). Esta característica es debido a que sus componentes (polares y no polares) de la tensión superficial o ELS son comparativamente mayores que las que presenta el adhesivo tipo A. Por consiguiente la mejor aplicación para estos dos aceros es el uso del adhesivo tipo B.
- Comparativamente, el acero AISI 4140 con relación al AISI 52100, tiene mejor comportamiento a la mojabilidad (con activador y sin él) y al trabajo termodinámico de adhesión, en virtud de sus diferencias en composición química y características físicas de las superficies. Por otro lado, esta situación es más influyente con el adhesivo tipo B, en virtud de sus características químicas y físicas.
- Las diferencias reportadas en la tensión total de los adhesivos obtenidas por el método del anillo de Du Nouy y por el método del vOGT, difiere particularmente en la suposición de las componentes polares para el agua y en la pureza y concentración de los líquidos patrones utilizados que pueden alterar en algún grado los valores de las componentes de la ELS. Por otro lado, el anillo de Du Nouy es un procedimiento que tiene más naturaleza física que química y menos complicado.

Referencias

1. J. Becher. "Influence of Surface Parameters to Joint Strenght". *Loctite Research, Development and Engineering. Global Engineering Center*. MAE 5020. Alemania. 1999. pp. 1-22
2. C. J. van Oss, R. J. Good, M. K. Chaundhury. "Additive and Nonadditive Surface Tension Components and the Interpretation of Contact Angles". *Langmuir* Vol. 4. 1988. pp.884-891.
3. C. Della Volpe. "The solid surface free energy calculation. I. In defense of the multicomponent approach". *Journal of Colloid and Interface Science*. Vol. 271.2004. pp. 434-453.
4. C. Della Volpe, S. Siboni. "Some reflections on acid-base solid surface free energy theories". *Journal of Colloid and Interface Science*. Vol. 195. 1997. pp. 121-136.
5. G. Milojka Gindl, Gerhard Sinn, Wolfgang Gindl, Alexander Reiterer, Stefanie Tschegg. "A comparison of different methods to calculate the surface free energy of wood using contact angle measurements". *Journal Colloids and Surfaces, Physicochemical and Engineering Aspects*. Vol. 181. 2000. pp. 279-287.
6. J. K. Spelt, B. E. I. Vargha. "Applied Surface Thermodynamics". A. W. Neumann. Canadá. 1996. pp. 379-411.
7. A. J. Kinloch. "Adhesion and Adhesives Science and Technology". Chapman and Hall. Gran Bretaña. 1990. pp. 1-170.