

Salvatierra, Lucas M. ; Kovalevski, Laura I. ; Dammig Quiña, Pablo L. ; Irurzun, Isabel M. ; Mola, Eduardo E.

Comportamiento mecánico y eléctrico de un gel de silicona empleado en el encapsulamiento de transistores de potencia tipo IGBT

Energeia, Año 10, N° 10, 2012

Este documento está disponible en la Biblioteca Digital de la Universidad Católica Argentina, repositorio institucional desarrollado por la Biblioteca Central "San Benito Abad". Su objetivo es difundir y preservar la producción intelectual de la Institución.

La Biblioteca posee la autorización del autor para su divulgación en línea.

Cómo citar el documento:

Salvatierra, L. M. et al. Comportamiento mecánico y eléctrico de un gel de silicona empleado en el encapsulamiento de transistores de potencia tipo IGBT [en línea]. *Energeia*, 10(10), 2012.
Disponble en: <http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/revistas/comportamiento-mecanico-electrico-gel.pdf>
[Fecha de consulta:]

Comportamiento mecánico y eléctrico de un gel de silicona empleado en el encapsulamiento de transistores de potencia tipo IGBT

L. M. Salvatierra ^{1,2*}, L. I. Kovalevski ^{1,2}, P. L. Dammig Quiña ², L. A. Herrera ^{1,2},
I. M. Irurzun ², E. E. Mola ^{1,2*}

(1) Facultad de Química e Ingeniería, Pontificia Universidad Católica Argentina, Pellegrini 3314, Rosario, Santa Fe, Argentina.

(2) Grupo de Sistemas Complejos, Instituto de Investigaciones Fisicoquímicas Teóricas y Aplicadas (INIFTA), Universidad Nacional de La Plata, CCT-CONICET La Plata, Diag. 113 y 64, La Plata, Buenos Aires, Argentina.

(*) Autor para correspondencia: eemola@inifta.unlp.edu.ar; lsalvatierra@inifta.unlp.edu.ar /@uca.edu.ar

Resumen. Los materiales dieléctricos son ampliamente utilizados en el sector energético, estando a veces sometidos a condiciones de alto estrés eléctrico, mecánico y ambiental en general, que los ponen al borde de procesos y mecanismos de degradación que conllevan a una probable falla futura. Los geles dieléctricos han comenzado a ser ampliamente utilizados en aplicaciones de encapsulamiento de transistores de alta potencia tipo IGBTs (del inglés Insulated Gate Bipolar Transistor), donde se manejan tensiones y corrientes considerables. En la mayoría de los casos, se necesita una protección para evitar descargas en fase gaseosa, ingreso de humedad al circuito y amortiguamiento mecánico para vibraciones. En el presente trabajo caracterizamos con diferentes técnicas aspectos destacables de este tipo de encapsulantes a base de un gel bifásico de silicona. Para observar el proceso de curado se empleó la técnica de espectroscopía de absorción infrarroja (FTIR), junto con la reología oscilatoria desde las propiedades mecánicas. A su vez, esta última, sirvió para comparar información provista por un novedoso concepto que implica observar a estas últimas desde el interior, a partir de la evolución de cavidades gaseosas generadas eléctricamente. Se comprobó que el comportamiento de estas cavidades es sensible a la historia previa del material, es decir, mecanismos de curado y envejecimiento previo.

PALABRAS CLAVES: Gel Silicona, IGBT, Curado, Módulo Elástico, FTIR, Dieléctrico, Cavidad

INTRODUCCIÓN

El desarrollo reciente de IGBTs de alta tensión con módulos de potencia de hasta 6.5kV ha conducido a mayores exigencias sobre el desempeño de materiales dieléctricos utilizados como aislantes (Figura 1). Los geles de silicona se utilizan con frecuencia para garantizar el aislamiento eléctrico dentro de estos módulos gracias a sus buenas propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas. Sin embargo, frente a elevados voltajes el campo eléctrico local puede llegar a ser lo suficientemente alto como para inducir descargas parciales altas (PD) en el gel. Los experimentos y simulaciones muestran que estas descargas se producen principalmente en los bordes afilados de conductores metálicos sobre sustratos cerámicos.

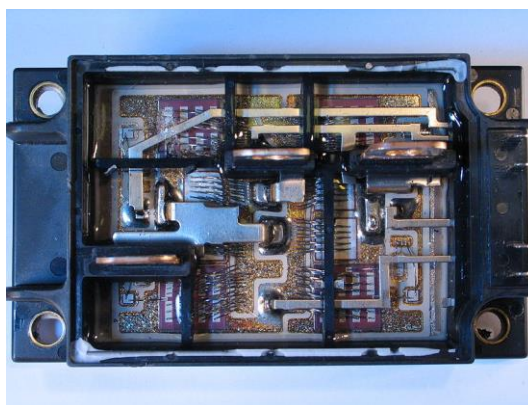
La forma de proteger a estos importantes circuitos electrónicos ampliamente utilizados en la industria, consiste en encapsularlos en geles de silicona. Cuando ellos son curados constituyen un material extremadamente blando y pegajoso. La característica final de un gel de silicona queda determinada por el número de reacciones que tienen lugar y la longitud de cadenas de los polidimetilsiloxano (PDMS). Poseen una gran capacidad de absorción de esfuerzo y amortiguamiento mecánico, tanto como de auto-reparación (en inglés, *self-healing*) ante daño de tipo físico, propiedades ampliamente deseadas para proteger equipos sensibles como circuitos eléctricos e integrados [1-3]. Evidencian cualidades de un líquido así como también proporcionan la estabilidad dimensional de un elastómero reticulado. Al margen de aplicaciones ampliamente explotadas, los geles de siliconas son utilizados para aislar los circuitos eléctricos de los efectos perjudiciales de la humedad y otros contaminantes y proporcionar aislamiento eléctrico para altos voltajes. La estabilidad física y eléctrica, en comparación con la de otros polímeros, se mantiene durante un intervalo de temperatura más amplio (desde -45°C a 200°C). Más recientemente, se ha encontrado aplicación de los geles de silicona en optoelectrónica debido a su capacidad para aliviar el estrés mecánico, sus altos índices de refracción, y la estabilidad de estas propiedades en el tiempo [1-3].

En el presente trabajo caracterizamos con diferentes técnicas aspectos destacables de este tipo de encapsulantes a base de un gel bifásico de silicona. Para el proceso de curado se empleó la técnica de espectroscopía de absorción infrarroja (FTIR), junto con la reología oscilatoria desde las propiedades mecánicas. A su vez, esta última, sirvió para comparar información provista por un novedoso concepto que implica observar a estas últimas desde el interior, a partir de la evolución de cavidades gaseosas generadas

eléctricamente. Se comprobó que el comportamiento de estas cavidades es sensible a la historia previa del material, es decir, mecanismos de curado y envejecimiento previo.



IGBT de 1200A y 3.3kV (h/6kV)



IGBT abierto de 400A y 600V

Figura 1: Transistores de potencia tipo IGBT

EXPERIMENTAL

De las muestras

Se utilizó un gel de silicona transparente de uso dieléctrico suministrado por Dow Corning. El sistema de cura implica la mezcla de dos componentes en relación 1 a 1, durante al menos 48hs a temperatura ambiente o 4hs a 60°C. Durante la preparación, ambas partes, parte A y parte B, se mezclaron manualmente y luego se realizó un degasificado de cinco minutos en vacío a temperatura ambiente. La mezcla fue colada en distintos moldes para la obtención de las geometrías requeridas, o in situ en una celda para FTIR o en la misma base inferior del reómetro.

Ensayos

Las muestras fueron analizadas en un Perkin Elmer Spectrum One FTIR. La parte A y parte B se midieron por separado en una celda soporte de cloruro de sodio (NaCl) y se realizó un curado in situ medido a diferentes intervalos de tiempo.

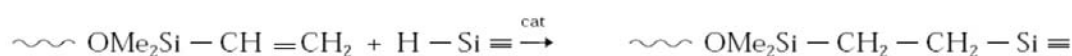
Los estudios reológicos se llevaron a cabo con un reómetro AR-G2 de TA Instruments. Las muestras fueron medidas isotérmicamente durante el proceso curado, con una deformación máxima de un 1% y realizado a diferentes frecuencias. Una vez finalizado el curado, se llevaron a cabo barridos de frecuencia a diferentes temperaturas.

Se relacionaron los resultados con el comportamiento dinámico de cavidades gaseosas provocadas en el seno de muestras especialmente preparadas. Las cavidades se generaron a partir de descargas parciales provocadas por un campo eléctrico altamente divergente, a través de un electrodo de tungsteno con diámetro de curvatura de su punta de 5µm y un voltaje aplicado sobre él de entre 7 y 8 kV_{rms} AC a 50Hz.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

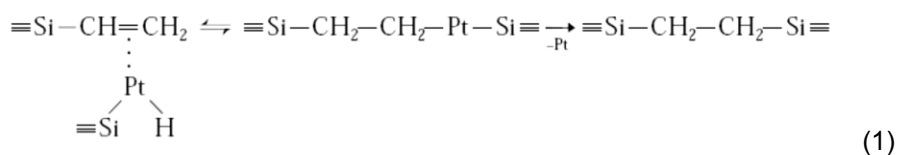
Absorción Infrarroja

En aplicaciones dieléctricas, la reacción de curado por adición se lleva a cabo usando polímeros de vinilo para poder conseguir la reticulación o crosslinking. Éstos reaccionan con los grupos SiH que poseen oligómeros presentes en uno de los reactivos.



donde $\equiv$ representa las valencias disponibles del Si.

La reacción de adición se produce principalmente en el carbono terminal y es catalizada por complejos de Pt (preferentemente se utilizan compuestos organometálicos para mejorar su compatibilidad), presentes en el otro reactivo. El siguiente mecanismo ha sido propuesto como una reacción de adición oxidativa del $\equiv\text{SiH}$ en Pt, donde hay una transferencia de H en el doble enlace, y una eliminación reductiva del producto [1,5]:



donde, para simplificar, los otros ligandos del Pt y las moléculas de Si sustituyentes se han omitido.

Esta reacción no genera subproductos, como por ejemplo en los curados por condensación o del tipo acético. Las piezas moldeadas utilizando este mecanismo de son muy precisas, sin fenómenos de contracción. Sin embargo, el manejo de estos geles en dos partes (polímero y catalizador Pt en un componente, oligómero SiH en el otro) requiere de ciertas precauciones para evitar la inhibición del catalizador [1,5].

En la Figura 2a, el pico de absorción a 2127cm^{-1} tiene una intensidad fuerte en el componente A y se relaciona con la oligómero $\equiv\text{SiH}$. Por lo tanto, la parte B debe presentar el catalizador de Pt. La secuencia de curado muestra un cambio abrupto e inicial en este pico, debido a la combinación de la mezcla física (dilución al 50%), y el comienzo de la reacción. Luego, es posible distinguir un consumo lento y progresivo de este radical según el tiempo de curado (ver Figura 2b).

En el proceso de adición, la columna vertebral de los enlaces Si-O-Si produce una banda ancha con dos máximos uno a 1092cm^{-1} y otro a 1018cm^{-1} . La banda de la deformación de metilo que se da a 1261cm^{-1} es fuerte y aguda, y la banda rock-metilo con una contribución del enlace Si-C a 798cm^{-1} y el estiramiento asimétrico del CH_3 en 2964cm^{-1} son también absorciones intensas.

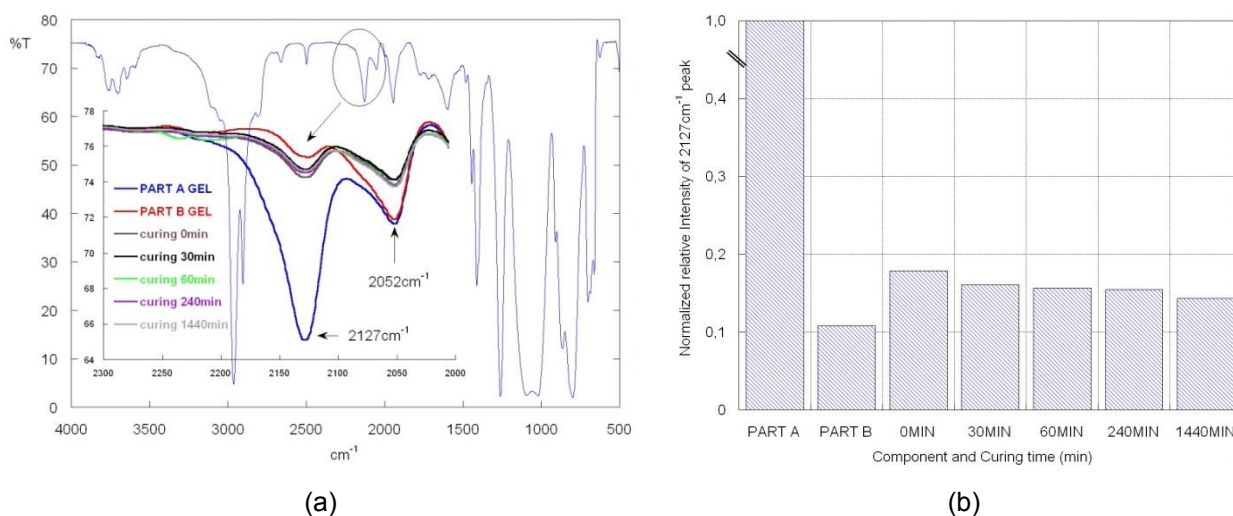


Figura 2: (a) Espectro de FTIR para la parte A. El recuadro inserto muestra la región 2127cm^{-1} de la parte A (azul), parte B (rojo) y el gel curado in situ durante diferentes tiempos: minuto 0 (verde oscuro), minuto 30 (negro), minuto 60 (verde), minuto 240 (violeta) y minuto 1440 (gris claro). (b) Intensidad relativa normalizada del pico 2127cm^{-1} contra el pico 1267cm^{-1} .

Análisis Mecánico

La Figura 3 muestra el proceso de curado a $T=60^\circ\text{C}$, deformación del 1% y frecuencia angular de 2rad/seg , medido en el reómetro AR-G2. Se muestra la evolución de ambas partes del módulo elástico de corte complejo: la parte real o G' y la parte imaginaria G'' en función del tiempo. El punto de gelificación se considera como el momento en que la muestra pasa de un estado líquido viscoso a otro con una estructura sólida, tipo elastomérica, representado por la intersección entre G' y G'' .

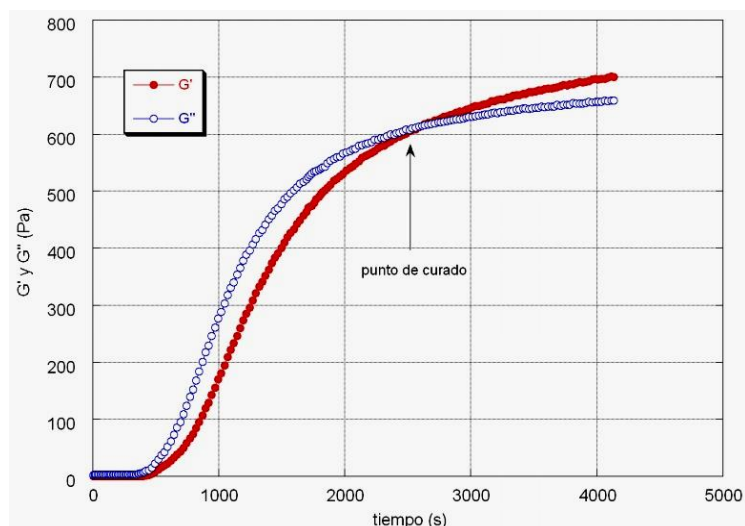


Figura 3: evolución de G' , G'' versus el tiempo de curado a 60°C , $\omega=2\text{rad/s}$ y a una deformación máxima del 1%.

La Figura 4 muestra barridos de frecuencia realizados después de la finalización del proceso de curado, estabilizado al cabo de 4hs. Como se puede observar, aparece un pico ancho de amortiguamiento con un máximo entre 5 y 10Hz. Sucesivos barridos a inferiores temperaturas a partir de 60°C (círculos azules), luego a 40°C (cuadrados rojos), a 20°C (rombos verdes) y 0°C (triángulos de color gris), muestran un corrimiento del pico de $\text{Tan}(\delta)$ a frecuencias más bajas; así como también se presenta una reducción en su altura. Para comprobar la estabilidad de la muestra, se realizó un barrido de frecuencia final a la temperatura de 80°C (triángulos negros rectangulares).

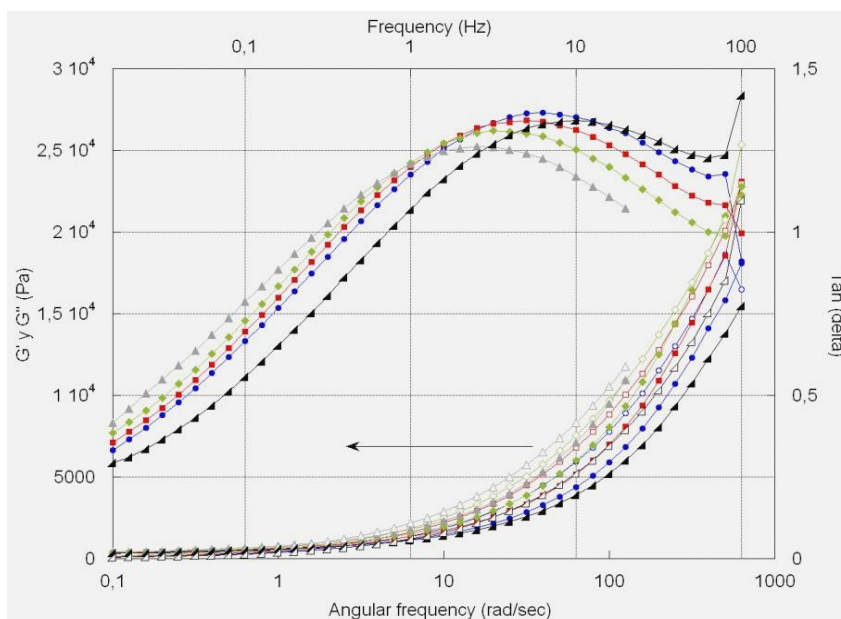


Figura 4: barridos de frecuencia después de la finalización del proceso de curado: a 60°C (círculos azules), a 40°C (cuadrados rojos), a 20°C (rombos verdes) y a 0°C (triángulos de color gris). El último realizado a 80°C (negros triángulos rectángulos).

La Figura 5 muestra un muy buen ajuste lineal en un plot de Arrhenius para los corrimientos en frecuencia de los picos de $\text{Tan}(\delta)$ de la Figura 4. La energía de activación obtenida es de alrededor de $9,68\text{kJ/mol}$. Por otra parte, el movimiento del mismo pico de $\text{Tan}(\delta)$ pudo ser descubierto también durante barridos de temperatura a distintas frecuencias constantes, presentándose como un pico muy ancho, ubicado entre la cola de alta temperatura del pico alfa o de transición vítrea ($T_g \cong -150^{\circ}\text{C}$) y temperaturas cercanas a 100°C (dependiendo de la frecuencia).

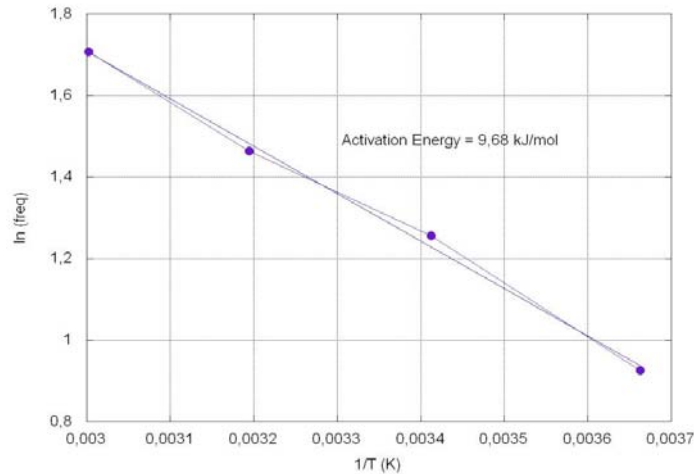


Figura 5: Energía de activación obtenida de la Figura 4.

El gráfico de Arrhenius de la Figura 5 muestra un ajuste perfecto con la ecuación de Williams-Landel-Ferry (WLF) [7] y el principio de superposición. Por lo tanto, estos geles de silicona exhiben un comportamiento reológico modelizable y podría ser utilizado para crear curvas maestras (master-plots) o estudiar más en profundidad los fundamentos de la mecánica del crosslinking de estos polímeros [8].

Por otra parte, la energía de activación obtenida de alrededor de 10kJ/mol y podría estar relacionada con una cinética de primer orden asociada a la movilidad de la fase líquida debida a la fracción de bajo peso molecular que se encuentra presente. Estos segmentos de bajo peso molecular (LMW, en inglés) son por un lado responsables de la baja T_g , y por otro lado, de uno de los mecanismos de auto-recuperación observados en estos materiales.

En la Figura 6 se puede observar la evolución de cavidades gaseosas provocadas en el seno de muestras especialmente preparadas. Las mismas se incorporaron a partir de descargas parciales provocadas por un campo eléctrico altamente divergente, a través de un electrodo de tungsteno con diámetro de curvatura de su punta de $5\mu\text{m}$ y un voltaje aplicado sobre él de entre 7 y 8 kV_{rms} AC a 50Hz. Posteriormente, se retiró el campo aplicado y se midió la evolución del área digital de cada una (proporcional al volumen real) en función del tiempo.

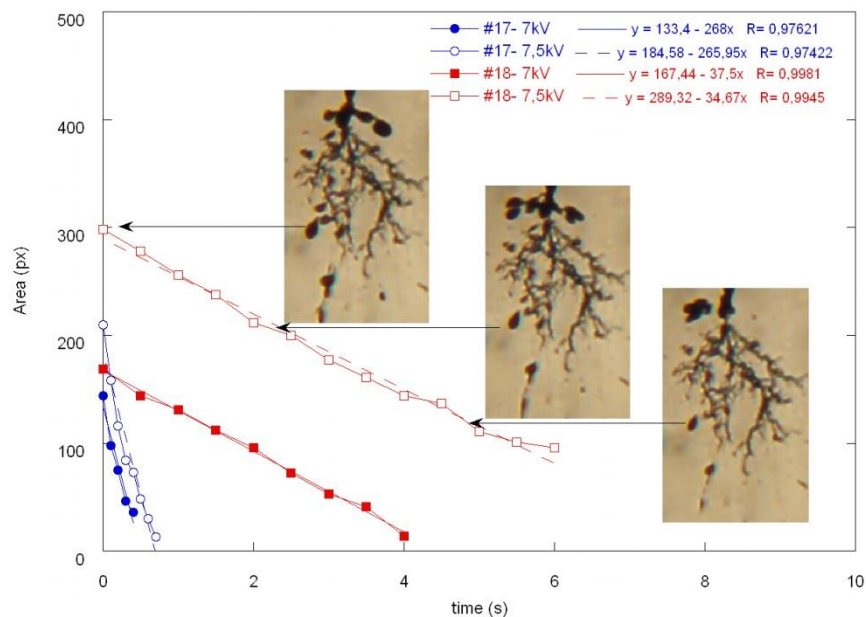


Figura 6: decaimientos del área de cavidades generadas eléctricamente en el seno de una muestra.

Este fenómeno dinámico de colapso de la cavidad de aire ocluida, es evidencia del fenómeno de auto-recuperación del daño físico, en este caso provocado eléctricamente [8]. Este comportamiento está asociado a la fracción de segmentos de cadena de bajo peso molecular (LMW), es decir, la fracción líquida de la matriz, cuya movilidad fue detectada en los ensayos reológicos. Esta fracción líquida es la encargada de difundir dentro de la cavidad gaseosa, la cual es simultáneamente comprimida como resultado de la respuesta elástica de la fase elastomérica entrecruzada.

De hecho, la caracterización del estado mecánico interno a partir de las velocidades de desaparición de cavidades gaseosas, permite obtener información microestructural complementaria a los ensayos tradicionales. Como puede observarse en la Figura 6, la técnica es también sensible a distintos estados microestructurales (por ejemplo, grado de cura, envejecimiento, etc.), que afecten las propiedades reológicas de la matriz bifásica, es decir, al módulo elástico intrínseco de la red entrecruzada o la fase móvil de LMW. Por ejemplo, una matriz más entrecruzada decaerá más rápido que otra que lo esté menos.

CONCLUSIONES

En este trabajo se caracterizaron aspectos importantes del proceso de curado de un gel de silicona bicomponente del tipo dieléctrico transparente. Se pudo identificar los roles de ambas partes tanto como su papel durante el curado a través de la técnica de espectroscopía de absorción infrarroja.

La utilización de técnicas reológicas tradicionales como la reometría oscilatoria, permitieron identificar a una fase líquida de bajo peso molecular, con una energía de activación cercana a los 10kJ/mol, responsable de uno de los mecanismos de auto-recuperación reportados en estos materiales.

Por otra parte, medidas del comportamiento mecánico intrínseco a partir de la evolución temporal de cavidades gaseosas generadas eléctricamente, permitieron relacionar el fenómeno de auto-recuperación o self-healing con las propiedades mecánicas medidas externamente.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado con financiamiento del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), de Argentina, de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT), de la Secretaría de Estado de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Provincia de Santa Fe (SECTel), de la Universidad Nacional de La Plata y de la Pontificia Universidad Católica Argentina, sede Rosario.

REFERENCIAS

- Colas, Chimie Nouvelle, vol. 8 (30), 847 (1990), from Dow Corning technical brochures.
- T. M. Do, O. Lesaint and J.-L. Augé, "Streamers and Partial Discharge Mechanisms in Silicone Gel Under Impulse and AC Voltages". IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 15, No. 6; December 2008.
- G. Finis and A. Claudi: On the Electric Breakdown Behavior of Silicone Gel at Interfaces. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 15, No. 2; April 2008.
- P. Gournay and O. Lesaint, "On the gaseous nature of positive filamentary streamers in hydrocarbon liquids. II: Propagation, growth and collapse of gaseous filaments in pentane", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 27, pp. 2117-2127, 1994.
- O. Stark et coll., Silicones, Comprehensive Organometallic Chemistry, vol. 2, 305, Pergamon Press, 1982.
- F. Gubbels, Silicones in the Electronics Industries, from Dow Corning technical brochures. Dow Corning Europe S.A, Seneffe, Belgium.
- J. D. Ferry, Viscoelastic Properties of Polymers, 3rd Ed., John Wiley and Sons, Inc.: New York, 1980; Chapter 11; 264-320.
- L. M. Salvatierra et al. Artículo en preparación. 2012.