
Comportamiento dieléctrico de materiales compuestos reforzados con Ground Tire Rubber (GTR)

J. Orrit¹, R. Mujal², F. Nogués³, X. Colom³

¹Departamento de Física Aplicada, ETSEIAT-UPC, E-08222 Terrassa, Spain

²Dept. Ingeniería Eléctrica, EET-UPC, E-08222 Terrassa, Spain

³Departamento de Ingeniería Química EET-UPC, E-08222 Terrassa, Spain mujal@ee.upc.edu

Dielectrical behaviour of composites reinforced with Ground Tire Rubber (GTR)

Comportament dielèctric de compositos reforçats amb Ground Tire Rubber (GTR)

Recibido: 26 de junio de 2009; revisado: 23 de septiembre de 2009; aceptado: 16 de octubre de 2009

RESUMEN

La masiva fabricación de neumáticos y la dificultad para su eliminación o almacenamiento constituye un grave problema medioambiental. En la actualidad, se utilizan diversos métodos para el reciclaje de neumáticos, como la trituración mecánica, en la que se separa el caucho vulcanizado del acero y las fibras, utilizándose este caucho en numerosas aplicaciones como pavimentos, aislantes, calzados, etc.

Con el presente estudio se pretende dar una nueva salida a los neumáticos fuera de uso (GTR), demostrándose su utilidad como dieléctricos. Para ello, se ha combinado GTR con policloruro de vinilo (PVC), obteniendo un material compuesto de matriz polimérica reforzado con GTR. Se ha caracterizado el comportamiento dieléctrico para las diversas mezclas del PVC con GTR (desde el 0% al 70% de GTR), en un rango de temperaturas que varía desde los 30°C hasta los 130°C, y con unas frecuencias desde $1 \cdot 10^{-2}$ Hz, hasta $1 \cdot 10^7$ Hz. Los ensayos eléctricos han permitido el análisis de la permitividad, la resistividad, el factor de pérdidas dieléctricas y los módulos de relajación (Arrhenius). Se ha comprobado como todas estas propiedades aumentan a bajas temperaturas (30°C). Asimismo, también se observa que la evolución de estos parámetros varía significativamente en función de la frecuencia y la temperatura.

Palabras clave: GTR, propiedades dieléctricas, materiales compuestos

SUMMARY

The huge manufacture of tires and the difficulty for its elimination or storage constitute a serious environmental problem. Nowadays, several methods for the recycling of tires are used, like the mechanical crushing, in which it separates the vulcanized rubber of the steel and fibers, being used this rubber in different applications like pavements, insulators, footwear, etc.

With the present study it is tried to give a new way to the obsolete tires (GTR), demonstrating his utility like dielectrics.

For it, GTR with vinyl polychloride has been combined, obtaining a composite of polymeric matrix reinforced with GTR. In order to determine the dielectric behavior of this composite material, different mixtures of PVC/GTR has been used (from 0% to 70% of GTR), in a range of temperatures from 30°C to 130°C, and a range of frequencies from $1 \cdot 10^{-2}$ Hz, to $1 \cdot 10^7$ Hz. The dielectrical tests have allowed the analysis of the permittivity, resistivity, the dielectric loss and the relaxation modulus (Arrhenius). It has been observed that all of these properties increase for lower temperatures (30°C), and them have a great dependence of the frequency and temperature.

Keywords: GTR, dielectrical properties, composites

RESUM

La gran quantitat de neumàtics i la dificultat per a la seva eliminació genera un gran problema mediambiental. Avui en dia, hi ha diferents mètodes per el reciclatge de neumàtics, entre els que cal destacar la trituració mecànica, on es separa el cautxú de l'acer i dels fibres. Aquest cautxú s'utilitza per paviments, aïllants, calçat, etc.

Amb aquest estudi es pretén donar una nova sortida a aquests neumàtics fora d'ús (GTR), demostrant la seva viabilitat com a dielèctrics. S'han format compostos barrejant PVC i GTR obtenint un material compost de matriu polimèrica reforçat amb GTR.

S'ha caracteritzat el seu comportament dielèctric per a les diferents barreges PVC/GTR (des del 0% al 70% de GTR), dins d'un ventall de temperatures que varia des de 30 fins a 130°C, y a unes freqüències des de $1 \cdot 10^{-2}$ Hz fins a $1 \cdot 10^7$ Hz. Els assajos realitzats de permitivitat, resistivitat, factor de pèrdues dielèctriques i mòdul de relaxament, han permès constatar que la incorporació de GTR fa augmentar tots aquests paràmetres a baixes temperatures (30°C), i que l'evolució d'aquests paràmetres varia significativament en funció de la freqüència i la temperatura.

Paraules clau: GTR, propietats dielèctriques, compòsits

1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de materiales poliméricos presentan muy buenas propiedades como materiales aislantes, con valores de conductividad por debajo de $10^{-12} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$. Se sabe que con la incorporación de aditivos conductores como grafito, negro de humo, óxidos metálicos, etc. se mejora significativamente la conductividad. De entre todos, el negro de humo es el que más se utiliza por su bajo coste y por su fácil manipulación.

El negro de humo es un componente importante en los neumáticos con porcentajes superiores al 30% [1], que se utiliza para mejorar el comportamiento abrasivo de los mismos. La gran cantidad de neumáticos fuera de uso que se generan anualmente en todo el planeta, obliga a su reciclado, siendo un reto que día a día muchos investigadores están abordando. Se están invirtiendo muchos esfuerzos para encontrar nuevos campos de aplicación que puedan absorber esta cantidad tan grande de GTR que se generan año tras año. El uso de estos GTR como refuerzos en materiales compuestos ha sido ampliamente estudiado en muchos trabajos [2-5]. La presencia de los mismos en materiales compuestos de matriz polimérica modifica tanto el comportamiento dieléctrico, como mecánico y térmico. Para mejorar el comportamiento dieléctrico es necesario dispersar, dentro de la matriz polimérica, materiales con alta capacidad dieléctrica como son el titanato de bario [6-7], o el titanato zircónico de plomo [8]. Sin duda el negro de humo es el aditivo más estudiado, Markov et al [9] han observado que la presencia de negro de humo y fibra de vidrio como refuerzo en materiales compuestos incrementa tanto las propiedades mecánicas como el comportamiento eléctrico. Naskar et al. [10] han estudiado el comportamiento dieléctrico entre distintos termoplásticos y los GTR. Los materiales compuestos son heterogéneos y sus propiedades dependen de la cantidad, el tamaño y la forma del refuerzo, así como de otros factores como son la preparación de los mismos y la compatibilidad entre ellos. El objetivo de este estudio pasa por buscar una nueva aplicación del GTR mezclado con el PVC, comprobando que el material compuesto resultante mantiene, dentro de unos valores aceptables, sus propiedades dieléctricas para ser utilizado como aislante eléctrico. Para ello, se ha analizado el comportamiento eléctrico (conductividad, permitividad, y módulo dieléctrico) de diferentes compuestos obtenidos mediante la mezcla de PVC con distintos porcentajes de GTR (desde el 0% hasta un 70% añadido de GTR), comprobándose su respuesta en función de la cantidad de GTR y viendo su posible viabilidad para su utilización en el ámbito dieléctrico.

2. MÉTODO EXPERIMENTAL

2.1 Materiales utilizados

El policloruro de vinilo fue suministrado por Ercros S.A (España) con el nombre comercial de Etinox, con un índice de fluidez de 1.35 g/min y una densidad de 1.225 kg/m³. El Ground Tire Rubber, con un tamaño de partícula inferior a 600 micras fue suministrado por Alfredo Mesalles (España), comprobándose mediante el TGA que su contenido de negro de humo estaba en torno al 35%.

2.2 Obtención de las muestras

Las muestras de GTR fueron previamente micronizadas hasta un tamaño medio de 100 micras, mediante un ta-

miz mecánico, y posteriormente secadas en un horno con aire forzado a una temperatura de 100°C durante 24 horas. Se prepararon seis muestras de material compuesto PVC/GTR de composiciones (5, 10, 20, 40, 50 y 70% de GTR). El proceso de mezclado se realizó mediante una calandra CollinW100T a 195°C. Para evitar cualquier tipo de degradación térmica sobre la matriz polimérica, se limitó el tiempo de permanencia en la calandra a un máximo de 5 minutos. Este bajo tiempo de mezcla no permite asegurar la correcta dispersión del GTR en la matriz del PVC, por lo que se realizó un estudio previo comparando las diversas mezclas obtenidas mediante rodillos con las mezclas realizadas con una mezcladora Brabender, observándose mínimas diferencias de homogeneidad entre los dos métodos, y por tanto, considerándose las muestras aptas para su análisis. La matriz de PVC se sometió al mismo proceso de calandrado, para simular la misma historia térmica que los distintos materiales compuestos obtenidos. Los laminados de PVC/GTR (150 x 150 x 2 mm) se obtuvieron mediante una prensa de platos calientes a 100 kN y 210°C durante 10 min. La etapa de refrigeración, con un circuito cerrado de agua corriente, se realizó en la misma prensa y a la misma presión.

2.3 Análisis dieléctrico

La permitividad dieléctrica (ϵ') y las pérdidas dieléctricas (ϵ'') fueron medidas mediante DEA (Análisis Dieléctrico) con el equipo BDS40 que lleva incorporado un sensor de temperatura Novotherm de Novocontrol, utilizando un molde de compresión de 2 cm de diámetro y 400 micras de espesor. Las medidas fueron realizadas durante un rango de frecuencias entre $1 \cdot 10^{-2}$ y $3 \cdot 10^6$ Hz en un barrido de temperatura entre 30 y 120°C a una velocidad de 3°C/min utilizando sensores de platos paralelos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las figura 1a y 1b muestran los resultados de conductividad del PVC y de los diferentes compuestos PVC/GTR (del 5% al 70% de GTR) a 30°C y 120°C respectivamente, en función de la frecuencia. Tal como se observa, a bajas temperaturas (30°C) hay un aumento de la conductividad en función de la frecuencia independientemente de la cantidad de GTR que incorpore el material compuesto. Asimismo, también se observa como la conductividad aumenta al incrementar el contenido de GTR, pasando de $4 \cdot 10^{-16}$ para el PVC hasta $7 \cdot 10^{-14}$ para el PVC+70%GTR a una frecuencia de 0.01 Hz. Por el contrario al aumentar la temperatura (120°C) el comportamiento de estos materiales es distinto, apareciendo dos zonas claramente diferenciadas: una a bajas frecuencias (hasta 100Hz) y otra a frecuencias superiores a 100Hz. (figura 1b). En la zona de bajas frecuencias la conductividad se mantiene constante y aumenta con el contenido de GTR, por el contrario a partir de 100 Hz la dependencia se aprecia lineal en una escala logarítmica y es independiente del contenido de GTR. Tal como describe León et al. [11] este comportamiento, es consecuente con una conductividad dispersiva sublineal del tipo:

$$\sigma = \sigma_0 + A\omega^n \quad (1)$$

donde σ_0 es la conductividad a corriente continua (DC) mientras que A y n (que toma valores comprendidos entre 0 y 1) son parámetros que dependen de la temperatura, del

material y del contenido de GTR. Esta relación se conoce como respuesta dinámica universal y es propia de materiales con un alto grado de desorden, como es el caso del PVC. El intervalo de frecuencias que separa ambas zonas se desplaza hacia valores más altos con la temperatura. Como se observa en la figura 1a, el área que corresponde al régimen DC no aparece para el rango de frecuencias estudiado. A 120°C (figura 1b), la conductividad a bajas frecuencias ha aumentado unos cuatro órdenes de magnitud, debido básicamente al aumento de la conductividad DC. Para altas frecuencias el aumento de la conductividad con la temperatura es mucho menor. Esto es consecuente con el hecho de que el GTR contiene elementos con una conductividad alta respecto del PVC, como es el negro de humo.

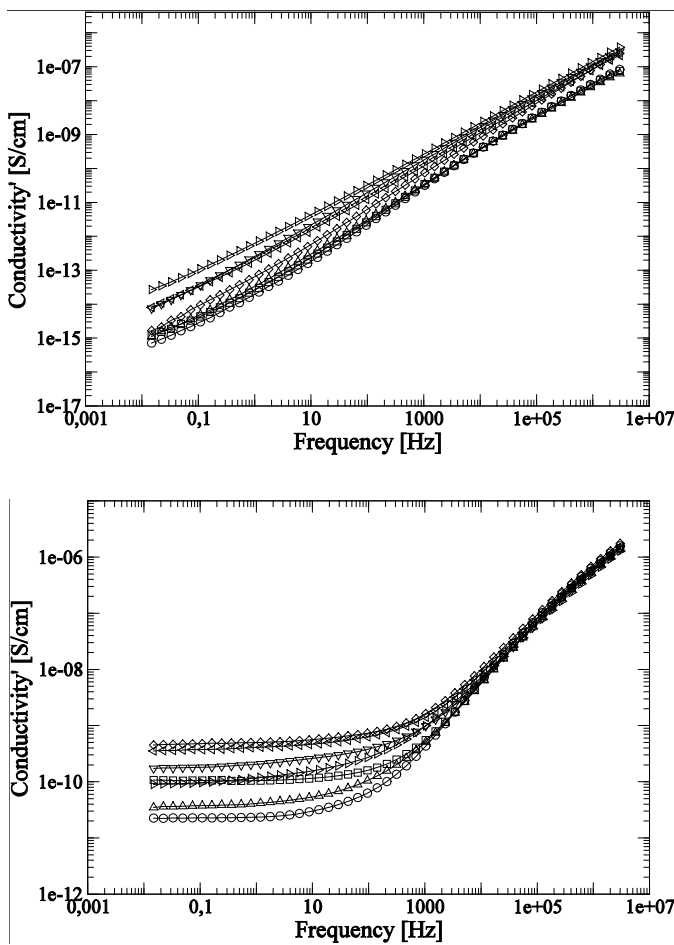


Figura 1. Conductividad σ para el PVC/GTR a) 30°C y b) 120°C, en función de la frecuencia: ○ PVC; □ PVC+5%GTR; ◇ PVC+10%GTR; △ PVC+20%GTR; ◁ PVC+40%GTR; ▽ PVC+50%GTR; ▷ PVC+70%GTR.

La figura 2 muestra los valores de la permitividad real (ϵ') y las pérdidas dieléctricas (ϵ'') del PVC y de los diversos compuestos PVC/GTR (del 5% al 70% de GTR) en función de la frecuencia, a una temperatura de 30°C. Tanto la permitividad real como las pérdidas dieléctricas se ven influenciadas por el contenido de GTR y por la frecuencia. Ambos parámetros (ϵ' y ϵ'') aumentan al incrementar el contenido de GTR, principalmente a bajas frecuencias.

Por otro lado, la permitividad decrece claramente con la frecuencia, debido a la dispersión dieléctrica [12], y las pérdidas dieléctricas (ϵ'') decrecen hasta una frecuencia alrededor de los 10Hz, para luego aumentar y pasar por un máximo situado entre $1 \cdot 10^4$ y $1 \cdot 10^5$ Hz. Este cambio de pendiente que se observa en ϵ'' se conoce como relajación β y está ligado a los movimientos locales de la cadena principal. La relajación β en el PVC ha sido previamente estudiado por Ishida et al. [13].

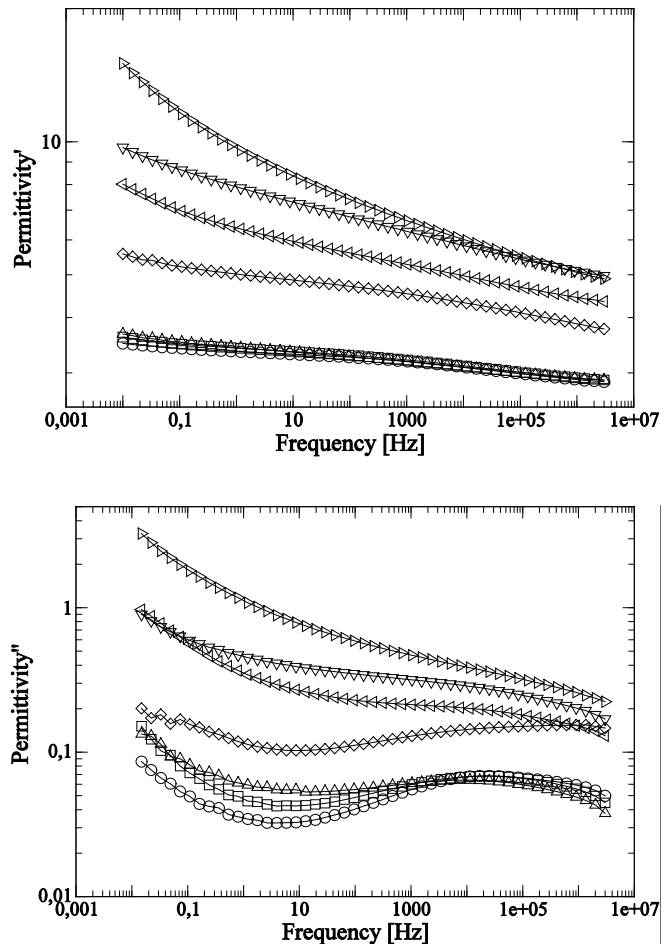


Figura 2. Permitividad dieléctrica (ϵ') y pérdidas dieléctricas (ϵ'') del PVC/GTR, a 30°C en función de la frecuencia: ○ PVC; □ PVC+5%GTR; ◇ PVC+10%GTR; △ PVC+20%GTR; ◁ PVC+40%GTR; ▽ PVC+50%GTR; ▷ PVC+70%GTR.

Para compuestos con contenidos de GTR por encima del 20% esta relajación β se vuelve menos significativa, hasta prácticamente desaparecer con un porcentaje de GTR del 70%. Este comportamiento es debido a la dificultad, que la presencia de altos contenidos de GTR provoca en los movimientos locales del Cl que forma parte de la cadena principal del PVC.

El comportamiento de la permitividad dieléctrica y las pérdidas dieléctricas del PVC y de los diversos compuestos PVC/GTR (del 5% al 70% de GTR) a una frecuencia constante de 50Hz, en función de la temperatura son mostrados en la figura 3. A bajas temperaturas la variación de

ambos parámetros (ϵ' y ϵ'') es prácticamente inexistente, aproximadamente a 80°C hay un importante crecimiento que coincide con la temperatura de transición vítrea (T_g). Asimismo también se aprecia una clara dependencia de ϵ' y ϵ'' con el contenido de GTR. Para compuestos con contenidos de GTR superiores al 20% los valores de ϵ' y ϵ'' van aumentando.

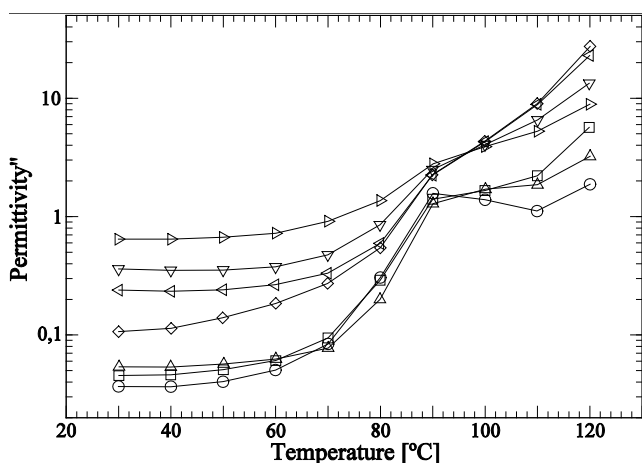
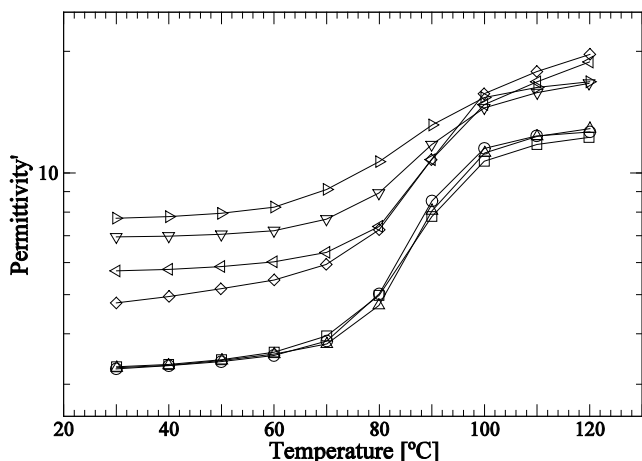


Figura 3. Permittividad dielectrica real (ϵ') e imaginaria (ϵ'') del PVC/GTR, a 50 Hz en función de la temperatura: ○ PVC; □ PVC+5%GTR; ◇ PVC+10%GTR; △ PVC+20%GTR; ▲ PVC+40%GTR; ▼ PVC+50%GTR; ▷ PVC+70%GTR.

Por debajo de la transición vítrea, las macromoléculas presentan muy poca movilidad y la temperatura apenas afecta a los cambios en las cadenas poliméricas. Cerca de la transición vítrea se producen reajustes conformacionales que dan lugar a otro tipo de relajación denominada relajación α .

La figura 4 muestra la evolución de la permitividad dieléctrica y las pérdidas dieléctricas del PVC a diversas temperaturas en función de la frecuencia. Como se observa el incremento del valor de la permitividad con la temperatura a una frecuencia de 0.01 Hz es significativo, pasando de un valor de 1.3 a 30°C hasta un valor de 35 a 120°C. En la gráfica correspondiente a las pérdidas dieléctricas, la relajación α , que como se ha comentado corresponde a

la transición vítrea del PVC, se desplaza hacia frecuencias más altas al aumentar la temperatura.

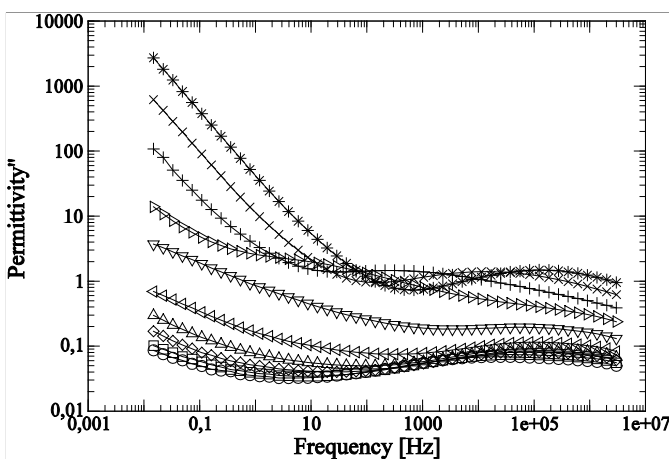
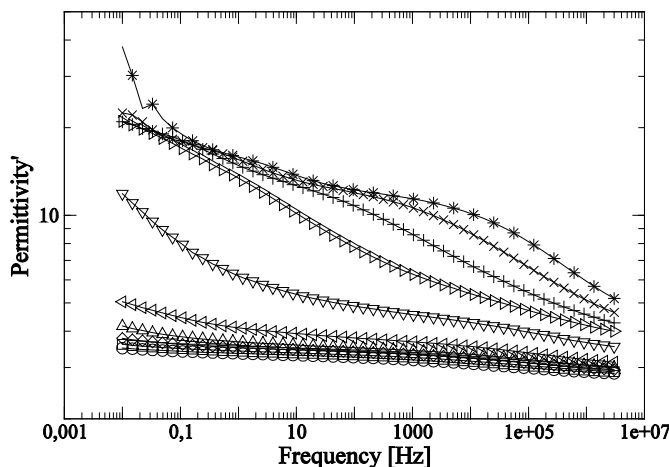


Figura 4. Permittividad dielectrica (ϵ') y pérdidas dieléctricas (ϵ'') a varias temperaturas para el PVC: ○ 30°C; □ 40°C; ◇ 50°C; ▲ 60°C; △ 70°C; ▼ 80°C; ▷ 90°C; + 100°C; × 110°C; * 120°C.

La figura 5 muestra la evolución de la permitividad dieléctrica y las pérdidas dieléctricas pero ahora del material compuesto PVC+GTR20% a diversas temperaturas en función de la frecuencia. El comportamiento es similar aunque el aumento de la permitividad a bajas frecuencias (0.01 Hz), es muy superior al observado para la matriz de PVC, pasando de 1.8 a 30°C hasta los 200 a 120°C. El aumento de la permitividad con la temperatura, tanto en el PVC como en los materiales compuestos PVC/GTR, se debe a la contribución de dos mecanismos: un aumento de la movilidad de las macromoléculas, con una disminución de la densidad que incrementan la permitividad y a una diferencia de expansión térmica entre las distintas zonas del propio polímero que la reduce [14]. Sin embargo y tal como se observa en las figuras 4 y 5, por encima de la T_g , la primera contribución es muy superior a la segunda con lo que la permitividad global aumenta. La presencia de partículas de GTR acentúa ambos mecanismos, siendo el resultado de ambas contribuciones un aumento signi-

ficativo de la permitividad. Este comportamiento, como han demostrado Saad et al. [12] y Tsangaris et al. [15] es muy similar al de la mayoría de materiales compuestos cargados con refuerzos con una conductividad muy superior a la propia de la matriz.

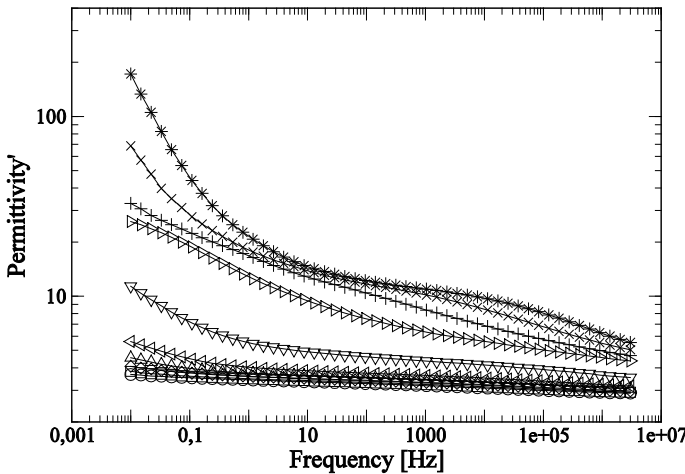
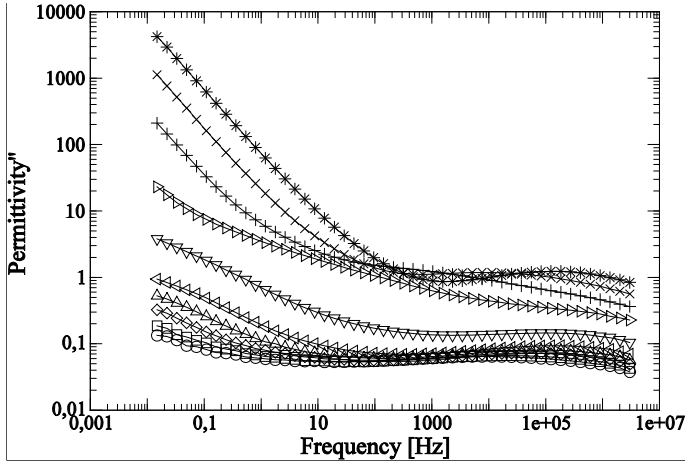


Figura 5. Permitividad dielectrica (ϵ') y pérdidas dieléctricas (ϵ'') a varias temperaturas para el PVC/GTR-20%:

○ 30°C; □ 40°C; ◇ 50°C; △ 60°C; ◁ 70°C; ▽ 80°C; ▷ 90°C; + 100°C, × 110°C; * 120°C.

Por otra parte, las pérdidas dieléctricas (ϵ'') también son muy superiores a bajas frecuencias debido a la polarización interfacial, la cual induce una relajación dieléctrica de Debye [16] que provoca que el pico de relajación se desplace hacia frecuencias más altas al aumentar la temperatura. Asimismo, comparando las figuras 4 y 5, se observa que la presencia de GTR aumenta la ϵ'' debido al efecto Maxwell-Wagner-Sillars (MWS), y la conductividad en corriente continua provocada por la movilidad de las cargas.

Es frecuente utilizar en estos análisis un formalismo denominado módulo eléctrico (ecuación 2) el cual permite estudiar mejor la polarización interfacial y el efecto Maxwell-Wagner-Sillars [14-18]. La contribución iónica en la región de bajas frecuencias y altas temperaturas hace que para el análisis de los fenómenos de relajación sea muy útil el uso de este módulo eléctrico.

$$M^* = \frac{1}{\epsilon^*} = \frac{1}{\epsilon' - j\epsilon''} = \frac{\epsilon'}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} + j \frac{\epsilon''}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} = M' + jM'' \quad (2)$$

La figura 6 muestra los valores de las componentes real (M') e imaginaria (M'') del módulo eléctrico para el PVC y los diferentes compuestos PVC/GTR (del 5% al 70% de GTR) a 120°C, en función de la frecuencia. El módulo eléctrico real crece significativamente con la frecuencia hasta un valor situado entre 1 y 200 Hz, dependiendo de la concentración de GTR, hasta estabilizarse. Por otro lado, a diferencia de lo que ocurre en la medida de las pérdidas dieléctricas (ϵ''), al analizar el módulo eléctrico imaginario (M'') se observa una nueva relajación a bajas frecuencias que podemos atribuir al efecto Maxwell-Wagner-Sillars, descrito anteriormente. Esta clase de relajación tiene su origen en la polarización interfacial y la conducción iónica y aparece en materiales heterogéneos. Semejante fenómeno ha sido detectado previamente por Saad et al. [12,19] en composiciones de PVC en la zona de bajas frecuencias y elevada conducción iónica. La matriz de PVC presenta esta relajación debido a la existencia de heterogeneidades estructurales [20], así como a la presencia de algunos aditivos que lleva incorporados.

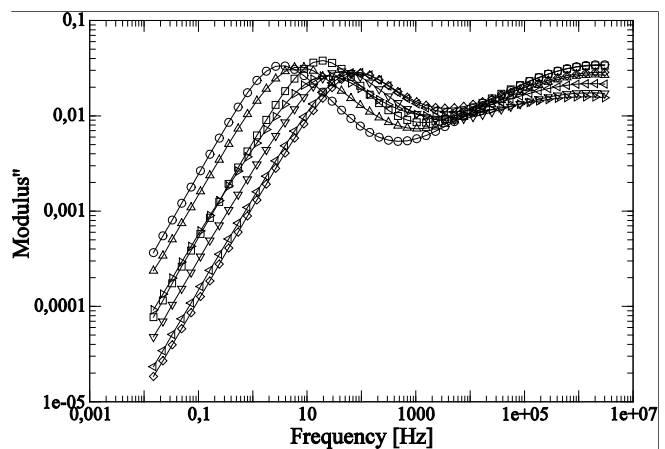
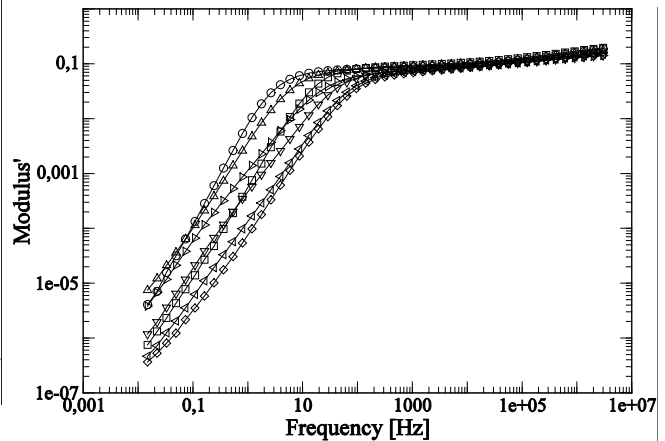


Figura 6. a) Módulo eléctrico real M' , y b) imaginario M'' del PVC/GTR a 120°C, en función de la frecuencia: ○ PVC; □ PVC+5%GTR; ◇ PVC+10%GTR; △ PVC+20%GTR; ◁ PVC+40%GTR; ▽ PVC+50%GTR; ▷ PVC+70%GTR.

Asimismo, la figura 6 muestra que a medida que aumenta el contenido de refuerzo GTR en los compuestos de PVC, el pico de relajación se desplaza hacia frecuencias más elevadas, debido al efecto de polarización interfacial con acumulación de cargas en la interfase matriz-refuerzo.

La relajación de Maxwell-Wagner-Sillars, como se ha comentado, viene causada por la polarización interfacial y la conducción iónica. En la figura 7 se observa la gráfica de la frecuencia del máximo de la relajación MWS en función del inverso de la temperatura para diversas muestras de PVC/GTR.

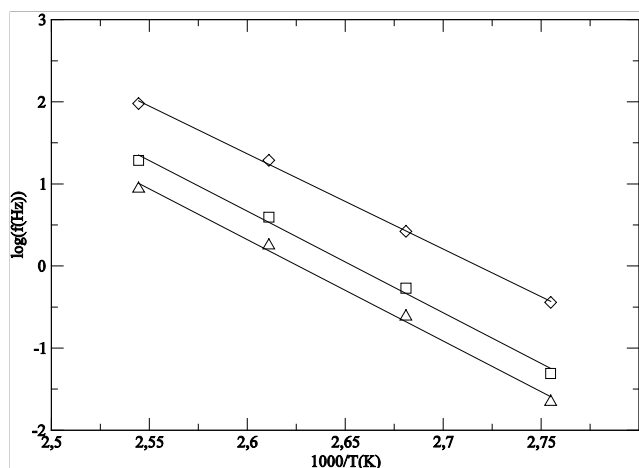


Figura 7. Representación del $\log f$ en función de $1/T$ para la relajación MWS: \square PVC+5%GTR; \diamond PVC+10%GTR; \triangle PVC+20%GTR.

$$f = f_0 e^{-\frac{E_a}{kT}} \quad (3)$$

También puede observarse en la gráfica de la figura 7, que esta correlación sigue una recta con pendiente negativa, que se ajusta perfectamente al modelo de Arrhenius (ecuación 3). Asimismo, en la tabla I se han tabulado los valores que se han obtenido de la energía de activación (E_a), así como del factor pre-exponencial ($\tau_0 = 1/f_0$). Como puede apreciarse, para concentraciones en los compuestos de hasta el 20% de GTR, la energía de activación se mantiene estable con un valor medio de 2.35 eV, y que a partir de esta concentración, se reduce significativamente con el aumento de GTR, hasta un valor de 0.75 para concentraciones del 70% de GTR. Este decrecimiento es debido a interacciones de tipo dipolar entre PVC-GTR [10]. El factor pre-exponencial se mantiene con unos valores por debajo de 10^{-30} , con concentraciones de hasta el 20% de GTR en el PVC, para aumentar hasta $1.25 \cdot 10^{-11}$, para concentraciones de GTR del 70% en el PVC. Este comportamiento indica que con concentraciones superiores al 20% de GTR en el PVC, la proximidad entre las partículas de GTR es lo suficientemente grande como para que exista una interacción significativa entre ellas. Los componentes polares de las interfaces PVC-GTR se ven influenciados por las cargas presentes en las interfaces vecinas, lo que significa que la energía necesaria para que los componentes polares puedan desplazarse o relajarse se ve reducida por la energía potencial electrostática proporcionada por dichas cargas. El aumento de la influencia entre las

interfaces provoca que la inercia frente a cualquier estímulo externo sea mayor, y por tanto a los componentes polares les es más difícil seguir la frecuencia del campo externo. Este hecho permite explicar porque los tiempos de la relajación MWS presentan este aumento significativo de $2.09 \cdot 10^{-30}$ hasta $1.25 \cdot 10^{-11}$.

Tabla I. Parámetros MWS para diversas concentraciones de GTR

%GTR	E_a (eV)	τ_0 (s)
0	2.27	$2.09E-30$
5	2.45	$1.56E-33$
10	2.30	$2.83E-32$
20	2.45	$3.46E-33$
40	1.76	$3.18E-25$
50	1.00	$3.82E-15$
70	0.75	$1.25E-11$

4. CONCLUSIONES

La incorporación de GTR en el PVC conlleva un aumento de la conductividad, la permitividad dieléctrica y las pérdidas dieléctricas a bajas temperaturas (30°C) del PVC sin mezcla. Asimismo, también se observa que la evolución de estos parámetros varía significativamente en función de la frecuencia y la temperatura. Valores de temperatura superiores a la Tg (80°C a 50Hz) provocan un incremento significativo tanto de la permitividad como de las pérdidas dieléctricas. Estas pérdidas dieléctricas son consideradas como la suma de las pérdidas debidas a los procesos de relajación tipo Maxwell-Wagner-Sillars así como del incremento de la conductividad de los compuestos. A altas frecuencias, las pérdidas debidas a la polarización interfacial son despreciables y el comportamiento dieléctrico de los compuestos es gobernado por las pérdidas de la matriz. Se ha detectado la presencia de una relajación β a bajas temperaturas y altas frecuencias y una relajación α por encima de la Tg en los distintos materiales compuestos estudiados. Mediante el uso del formalismo del módulo dieléctrico se ha podido localizar, en la región de bajas frecuencias y altas temperaturas, una relajación atribuida a un fenómeno interfacial Maxwell-Wagner-Sillars. Mediante esta relajación se han ajustado los datos experimentales a una función tipo Arrhenius, obteniendo las energías de activación y factores pre-exponenciales correspondientes. Ambos parámetros se ven influenciados significativamente por el contenido de GTR en los compuestos a partir del 20% de concentración. Así, la energía de activación disminuye considerablemente mientras que los tiempos de relajación naturales crecen exponencialmente. Se atribuye este comportamiento a la posible interacción entre partículas de GTR cuando la concentración de estas partículas en el PVC es superior al 20%.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia y Tecnología la financiación recibida para desarrollar el proyec-

to MAT 2007-64569, y el soporte en la realización de las pruebas eléctricas al Departamento de Física Nuclear de la Universidad Politécnica de Catalunya, sección de Terrassa, con especial mención a los profesores M. Mudarra y J Belana.

BIBLIOGRAFÍA

1. De, S.K; Isayev, A.I; Khait, K. Rubber Recycling, Taylor&Francis, Boca Raton (USA) 2005.
2. Colom, X. Carrillo, F. Cañavate, J. Composites part A-applied science and manufacturing 38(1) 44 (2007)
3. Colom, X. Cañavate, J. Carrillo, F. Suñol, J.J. Journal of Applied Polymer Science 112(4) 1882 (2009)
4. Fuhrmann I., Karger-Kocsis J. Journal of Applied Polymer Science 89 1622 (2003)
5. Colom, X.; Cañavate, J.; Carrillo, F.; Velasco, J.I.; Pagès, P.; Mujal, R.; Nogués, F. European Polymer Journal 42 2369-2378 (2006)
6. Sekar R, Tripathi A.K. Pillain P.K.C Materials Science and Engineering B 5, 33 (1989)
7. Chanmal C.V Jog J.P. eXPRESS Polymer Letters, 2(4) 294 (2008)
8. Qijia He; Aimin Zhang Journal Material Science 43,820 (2008)
9. Markov A, Fiedler B, Schulte K, Composite Part A 37, 1390 (2006)
10. Naskar, A.K. Khastgir, D. Bhowmick A.K. De S.K. Journal of Applied Polymer Science 84,993 (2002)
11. León C., Lucía M.L., Santamaría J. Physics Review B, 55(2) 882 (1997)
12. Saad, A.L.G.; Aziz, H.A.; Dimitry, O.I.H Journal of Applied Polymer Science, 91, 1590 (2004)
13. Ishida, Y. Kolloid Z., 168, 29 (1960).
14. Tsangaris, G.M. Psarras G.C. Journal of Material Science 34, 2151 (1999)
15. Tsangaris, G.M. Psarras, G.C. Koulombi, N. Journal of Material Science 33 2027 (1998)
16. Tsangaris G.M. Koulombi N, Kyvelidis, S. Material Chemical Physics 44, 245 (1996)
17. Ramajo, L. Reboredo, M.M. Castro, M.S., Revista Matéria, 10 (4); 556 (2005)
18. Psarras G.C., Manolakaki E., Tsangaris G.M.; Composites A, **33**, 375 (2002).
19. Saad, A.L.G.; Hassan, A.M.; Youssif, M.A.; Ahmed M.G.M.; Compositions; Journal of Applied Polymer Science, **65** (1) 27 (1997)
20. Steeman, P.A.M.; Gondard, C.; Scherrenberg, R.L. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics; 32(1) 119 (1994).