

## INFLUENCIA DEL POST-CURADO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA RESINA EPOXI REFORZADA CON SiC: ESTUDIO ESTADÍSTICO

**Juana Abenojar\*, Francisco Velasco, Miguel A. Martínez**

Grupo de Comportamiento en Servicio de Materiales. Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química. Universidad Carlos III de Madrid. Avenida de la Universidad, 30. E-28911 Leganés. España. Correo electrónico: [abenojar@ing.uc3m.es](mailto:abenojar@ing.uc3m.es)

*Recibido: Agosto 2008; Aceptado: Febrero 2009*

### RESUMEN

Este trabajo estudia el efecto del post-curado en un PMC, base epoxi reforzado con carburo de silicio (SiC) en diferentes proporciones y granulometrías. Para ello se utilizan dos temperaturas de post-curado (80 y 100°C) y un tiempo de una hora. Las propiedades mecánicas que se evalúan para determinar este efecto son la dureza *Shore D*, la resistencia a la flexión y como propiedad física la densidad. Con los valores obtenidos se realiza un estudio estadístico para ver si existen diferencias significativas entre los valores medios de las propiedades estudiadas, con los distintos post-curados para cada material. Se ha verificado si los resultados se ajustan o no a una distribución normal, para elegir el test adecuado de igualdad de medias. Se ha visto que el post-curado no afecta ni a la densidad ni a la dureza. En cuanto a la resistencia, el post-curado es importante para el material base y cuando se le adiciona un 12% de carburo de silicio nanométrico.

**Palabras claves:** resina epoxi, post-curado, carburo de silicio, propiedades mecánicas, estadística.

### ABSTRACT

This paper studies the effect of post-curing in an epoxy-based PMC reinforced with SiC, in different amounts and particle sizes. To achieve this, two post-curing temperatures (80 and 100°C) were used for 1h. The mechanical properties evaluated to determine the post-curing effect are the Shore D hardness, bending strength, and density as a physical property. Statistical analysis of the results was carried out to determine if there are significant differences between the average values of the studied properties, with various post-curing for each material. It has been verified whether or not results follow a normal distribution, to select the adequate test for equality of means. It has been proved that post-curing does not affect the density or hardness. In the case of strength, post-curing is important for the base material and when a 12% of nanometer SiC is added.

**Keywords:** epoxy resin, post-curing, silicon carbide, mechanical properties, statistics

### 1. INTRODUCCIÓN

Durante el proceso de curado, la resina epoxi se transforma pasando de ser un material de bajo peso molecular a ser un sistema polimérico con alto grado de entrecruzamiento, y son estas cadenas entrecruzadas las que confieren las características de rigidez y resistencia [1].

Los epoxis empleados en aplicaciones estructurales deben ser curados a temperaturas altas o a temperatura ambiente con post-curado por calor. Algunos adhesivos epoxis requieren un post-curado para mejorar su resistencia con una temperatura y un tiempo específico de

post-curado indicado por el fabricante en la hoja de datos técnicos. Los adhesivos deben alcanzar esta temperatura para completar la reacción química y optimizar sus propiedades [2]. La ventaja del post-curado como operación independiente, incluso en el caso de juntas ya curadas con algo de calor, es que puede ser realizado sin el uso de sistemas de sujeción. En general, el post-curado incrementa la temperatura de transición vítrea [3] y mejora propiedades tales como: resistencia a agentes químicos, estabilidad térmica, estabilidad dimensional, resistencia eléctrica y resistencia a la humedad.

En una de las barreras de contención de un reactor nuclear se usa un recubrimiento epoxi. *Lee et al.* [4] y *Park et al.* [5] encontraron que las propiedades térmicas internas del epoxi, como son la estabilidad térmica y la  $T_g$ , están muy influenciadas por la dosis de irradiación recibida, de la misma forma que la inmersión en agua caliente. Bajo estas condiciones, las resinas epoxi se comportan mejor con un post-curado, ya que se incrementa el entrecruzamiento, teniendo esto un papel muy importante en el aumento de la adhesión del sistema de recubrimiento epoxi.

También hay otro tipo de polímeros en los que las propiedades se ven afectadas por procesos de post-curado. Por ejemplo, en películas de polímeros de poliamida, la resistencia a tracción y el alargamiento de la película, básicamente rígida, puede mejorar mediante post-curado a 360-370°C durante una hora. En general, para un polímero las propiedades de tracción dependen de muchos factores, tales como la viscosidad, condiciones de procesado, etc. Según *Khatua y Maiti* [6], la resistencia a tracción y la elasticidad, normalmente aumentan con la viscosidad del polímero.

En otras aplicaciones, como puede ser recubrimientos en recipientes de hojalata para comida, *Fragni et al.* [7] mostraron que el tratamiento térmico de post-curado mejora también las propiedades de adhesión. Otros autores, entre los que se encuentran *Miettinen et al.* [8] y *Liétard et al.* [9], han realizado estudios de los efectos del post-curado en polímeros reforzados con fibra de vidrio (GRP). El post-curado en este tipo de polímeros tiene un pequeño efecto en la absorción de agua y una influencia significativa en la reducción de la solubilidad. Durante el post-curado a temperaturas por encima de la  $T_g$  del polímero, los monómeros de las resinas tienen una mejor capacidad para polimerizar debido a la mayor movilidad de las cadenas moleculares y la neutralización de la inmovilización de los monómeros residuales en el polímero [10].

Los adhesivos son materiales en los que aspectos como una correcta limpieza de las superficies o una buena distribución del adhesivo son fundamentales a la hora de tener buenas propiedades en la unión. El gran número de parámetros que pueden influir, hace que sea

necesario un gran número de ensayos para tener datos fiables. Dada la variabilidad de los resultados mecánicos en las uniones adhesivas, es necesario aplicar técnicas de análisis estadístico como los test de contraste hipótesis (descritos por *Montgomery* y *Runger* [11]) o los análisis de fiabilidad basados en la distribución de *Weibull* [12], empleados entre otros por *Towse* et al. [13], *Seo* y *Lim* [14] y *Pantoja* et al. [15].

## 2. PROCESO EXPERIMENTAL

En el ámbito del presente estudio, se fabrican materiales compuestos de matriz polimérica utilizando carburo de silicio de dos granulometrías diferentes (10  $\mu\text{m}$  y tamaño nanométrico) y una resina epoxi. El refuerzo se añade en diferentes proporciones 6 y 12% (en peso). Para su mezcla se utiliza un método de agitación mecánico, en el que se aplica una alta velocidad de cizalla, manteniendo esta constante durante un tiempo aproximado de 5 minutos. Posteriormente la mezcla se vierte sobre moldes para obtener la forma de las probetas deseadas.

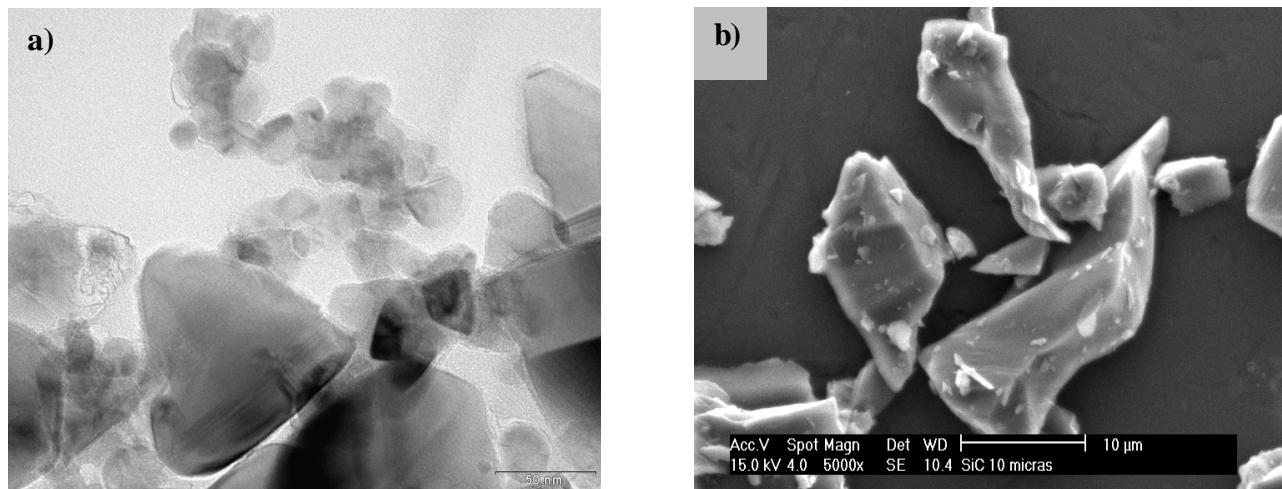


Figura 1. Micrografías correspondientes al carburo de silicio a) nanométrico y b) 10  $\mu\text{m}$ .

La resina epoxi utilizada es bicomponente (EPOFER EX401 + endurecedor EPOFER E432), suministrada por *Ferocast* [16], siendo su viscosidad 1300 cps. El carburo de silicio es atractivo como refuerzo debido a su baja densidad y elevada rigidez y resistencia junto con su buena estabilidad y conductividad térmica. El carburo de silicio de 10  $\mu\text{m}$  es suministrado por *Carburos Navarro S.A.* y su morfología es poligonal. El carburo de silicio nanométrico es suministrado por *Broker Research S.L.*, con un tamaño de partícula inferior a 100 nm. En la Figura 1 se pueden ver las micrografías del polvo de carburo de silicio utilizado.

De cada material se fabrican 60 probetas (un total de 300), de las cuales 20 se ensayan

después del curado a temperatura ambiente, otras 20 se introducen en un horno a 80°C durante una hora y se ensayan después; para las otras 20, el tratamiento térmico se realiza a 100°C también durante una hora. Las muestras son pesadas y medidas antes del tratamiento y después para evaluar si hay cambio en la masa y en las dimensiones. Mediante este estudio se puede calcular la densidad del material y su variación con el post-curado.

Las propiedades mecánicas evaluadas en estos materiales son la dureza *Shore D*, la resistencia a flexión y la deformación, evaluándose estas mediante el ensayo de resistencia en tres puntos. Dada la gran cantidad de resultados, se ha realizado un análisis estadístico de los datos para conocer si existen diferencias estadísticas entre las diferentes temperaturas de post-curado para cada material y también se han comparado los 5 materiales entre sí para cada condición de post-curado. Para ello, en primer lugar, se realiza un estudio para conocer la normalidad de los datos (para cada material, condición y propiedad), ya que esto da información sobre el test estadístico a realizar para comprobar la igualdad de las medias de los datos. Todo el análisis estadístico se ha llevado a cabo con el programa *Statgraphics*.

Para hacer el tratamiento estadístico lo primero es comprobar que todos los coeficientes de asimetría y de *curtosis* de cada una de las poblaciones (material y post-curado) están englobados en el intervalo (-2,2). Entonces los datos del muestreo se pueden analizar con una distribución normal. Posteriormente, se comparan poblaciones aplicando el test de análisis de la varianza. Al aplicar el análisis de varianza pueden suceder dos cosas: (i) que el p-valor sea menor que 0,05 por lo que se puede asegurar que hay diferencia significativa entre los valores y (ii) que p-valor sea mayor o igual que 0,05, en cuyo caso no hay una diferencia estadística significativa entre las medias de las variables con un 95% de nivel de confidencialidad. Si alguna de las distribuciones es no normal, se aplica entonces el test de *Krustall-Wallis* donde se comparan medianas. Con este test se vuelve a tener las dos mismas posibilidades, si ahora el p-valor es mayor o igual que 0,05 se puede asegurar que no hay diferencia significativa entre los valores. También estadísticamente se realiza un análisis de regresión para estudiar la dependencia de la dureza y la resistencia a flexión con la densidad.

### 3. RESULTADOS

La densidad presenta una distribución no normal para todos los materiales. Gráficamente en la Figura 2, se puede observar como en general sí hay un aumento de la densidad con el post-curado para todos los materiales excepto para el material con el 12% de carburo de silicio nanométrico. Sin embargo, estadísticamente, no hay diferencias significativas en los valores de densidad para tres de ellos al realizar el post-curado: Epofer +

6% SiC (10 $\mu$ m), Epofer + 6% SiC (nano) y Epofer + 12% SiC (nano). Estos tres materiales no presentan diferencias significativas, con un 95% de confianza, en la densidad al realizar el post-curado, ya que los p-valores son siempre mayores que 0,05 (Tabla 1). Sin embargo, para el *Epofer* sin refuerzo se observa una desviación en la mediana para el material sin post-curado, al igual que para el material *Epofer* + 12% SiC (10 $\mu$ m), como muestran los p-valores (menores de 0,05) de la Tabla 1, siendo los únicos materiales en los que el post-curado sí que influye sobre la densidad.

Al comparar los materiales entre sí para cada condición de post-curado, sí que se observan diferencias en las densidades de los materiales ya que todos los p-valores son menores que 0,05, como se intuye de la Figura 2.

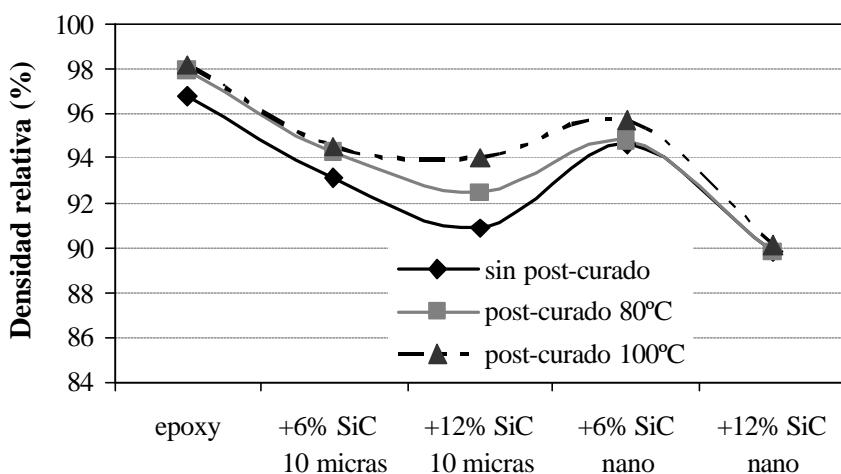


Figura 2 Variación de la densidad con la temperatura de post-curado.

Tabla 1. p-valores resultantes de la comparación de medias o medianas para evaluar la influencia del post-curado en las propiedades de los materiales estudiados.

Material	Densidad	Dureza	Resistencia a flexión	Deformación
Epofer	0,039	0,030	0,026	0,807
Epofer + 6%SiC (10 $\mu$ m)	0,985	0,832	0,373	0,300
Epofer + 12%SiC (10 $\mu$ m)	0,036	0,127	0,130	0,262
Epofer + 6%SiC (nano)	0,489	0,885	0,932	0,144
Epofer + 12%SiC (nano)	0,215	0,170	0,000	0,051

El estudio estadístico de la dureza presenta una distribución normal para todos los materiales excepto para el material Epofer + 6% SiC (nano). Aplicando el test de análisis de varianza y el de *Krustall-Wallis*, solo en el *Epofer* se observa que existe influencia estadística (con el 95% de confianza) del post-curado en la dureza del material, como se ven en los p-valores (Tabla 1). Así, hay una ligera superioridad de la dureza en las muestras que han sido sometidas a tratamientos de post-curado, tanto mayor cuanto mayor es la temperatura a la que se ha realizado el tratamiento. Para el resto de materiales no hay diferencias significativas. En la Figura 3 se puede observar gráficamente como prácticamente no hay diferencias entre los materiales sin post-curado con los que tienen post-curado, las pequeñas diferencias solo se observan en el análisis estadístico. La razón puede hallarse en la ligera mejora de densidad que mostraba el *Epofer* (véase la Tabla 1), además de una mejora en el grado de entrecruzamiento. En los materiales reforzados, el efecto de las partículas de carburo de silicio añadidas minimiza el efecto de la densificación y no parece que el grado de entrecruzamiento mejore tanto como para que la dureza mejore.

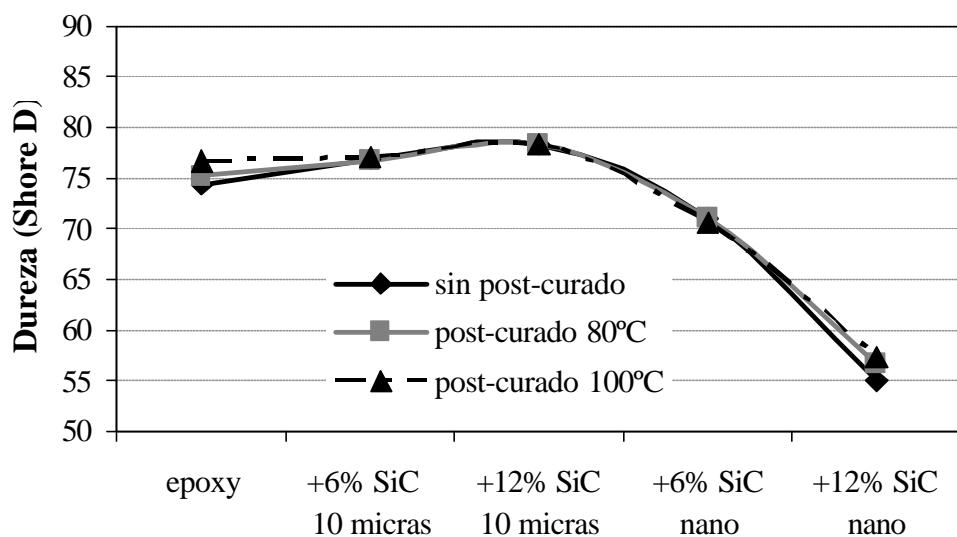


Figura 3. Variación de la dureza con la temperatura de post-curado.

Al comparar estadísticamente los cinco materiales entre sí para cada una de las condiciones de post-curado, sí que se han encontrado diferencias significativas estadísticas entre ellos, con el 95% de confianza, al ser todos los p-valores menores de 0,05. Se produce un aumento para los materiales con adiciones de carburo de silicio micrométrico y una disminución para los materiales con adiciones de partículas nanométricas, gráficamente se pude observar el mismo efecto (véase la Figura 3). El ligero aumento de las durezas con las partículas micrométricas se debe al tipo de refuerzo, mientras que el descenso con las

partículas nanométricas se debe a una falta de crecimiento en las cadenas del epoxi al interferir las partículas.

Como en los casos anteriores, el primer análisis estadístico realizado con los resultados de la resistencia a flexión en tres puntos es comprobar si las distribuciones son normales. Se encuentra que todas las distribuciones son normales, excepto cuando al epoxi se le adiciona un 12% de partículas independientemente del tamaño y de la temperatura de curado. Si ahora se estudia la influencia del post-curado para cada material, se observa que existen diferencias significativas en la resistencia a flexión con el post-curado en el *Epofer* puro (material base) y en el material con un 12% de partículas nano, con un 95% de confianza. Los p-valores se pueden ver en la Tabla 1. En estos dos materiales la resistencia del material mejora con el post-curado cuando se realiza a 100°C, como puede observarse en la Figura 4. En los otros tres materiales, los p-valores son mayores que 0,05 (Tabla 1). Eso implica que el proceso de post-curado no les ha afectado, y que por tanto los valores son similares, teniendo en cuenta el valor medio y la desviación estándar medidos en cada caso (aunque en la Figura 4 puedan apreciarse valores que parezcan estar muy distanciados).

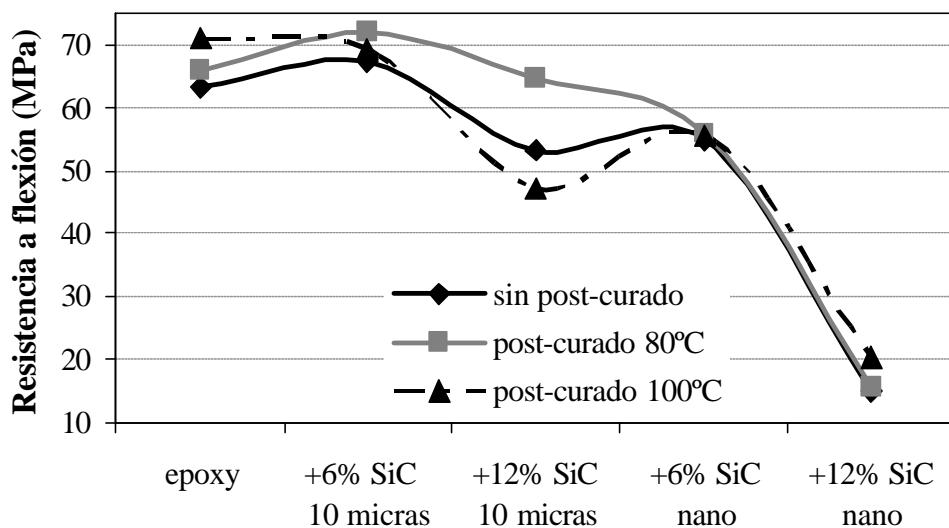


Figura 4. Variación de la resistencia a flexión con la temperatura de post-curado.

Cuando el estudio estadístico se realiza entre todos los materiales para cada una de las temperaturas de post-curado, se encuentran diferencias significativas entre los materiales. Las diferencias significativas las aporta el material reforzado con el 12% de nanopartículas donde la resistencia cae considerablemente, como gráficamente se puede comprobar en la Figura 4.

En los valores representados en la Figura 4 se observa, que aun existiendo una

diferencia moderada para los cinco casos, se puede ver que aumenta la resistencia a flexión para un porcentaje del 6% de partículas micrométricas, mientras que disminuye para el caso de partículas nanométricas. Parece que se puede tomar como regla que al aumentar el porcentaje de partículas independientemente de su tamaño, la resistencia a flexión disminuye. La forma de las partículas micrométricas, poligonales con grandes picos y aristas, es la causante de que la resistencia caiga para altas concentraciones de partículas. En el caso de las partículas nanométricas, aparentemente se produce un efecto de plastificación por lo que la resistencia es muy baja y la deformación muy alta, como se ve en la Figura 5. También en la Figura 5 puede observarse el mismo resultado, donde las barras de error de las diferentes medidas se solaparían.

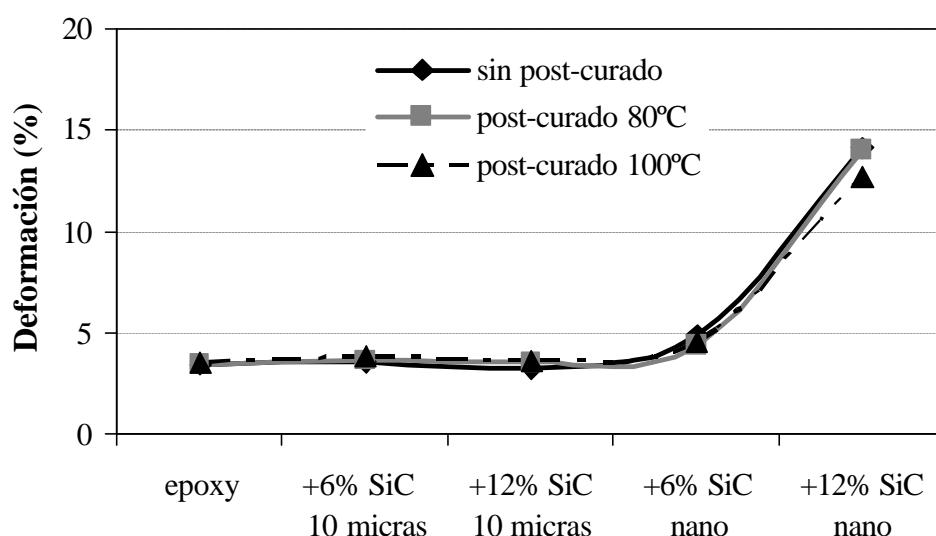


Figura 5. Variación de la deformación con la temperatura de post-curado.

En el análisis para cada material de la deformación durante el ensayo de flexión, esta propiedad también presenta diferentes tipos de distribuciones, siendo normales para los materiales que contienen un 12% de partículas y distribuciones no normales para el resto. En ninguno de los materiales se observa influencia estadística del post-curado, con un 95% de confianza, como revelan los p-valores (véase la Tabla 1), mayores que 0,05 todos. También gráficamente (Figura 5) se puede observar el mismo resultado.

En el análisis de varianzas usado para la comparación entre materiales a una misma temperatura de post-curado, se encuentra que a las tres temperaturas hay diferencias significativas entre los cinco tipos de materiales. Esta diferencia siempre es debida al material con el 12% de partículas nanométricas.

A continuación se presenta el análisis de regresión donde se trata de estudiar la posible

dependencia de la resistencia a flexión y la dureza *Shore* con la densidad. En primer lugar se hará una comparación del ajuste de los distintos modelos de regresión a los datos, considerando como bueno el modelo con mayor valor del coeficiente de correlación  $R^2$ , para después aplicarlo a nuestros valores.

Dependiendo del *p*-valor el grado de confianza será mayor o menor y el valor de  $R^2$  indica que el modelo ajustado explica un porcentaje de la variabilidad de la densidad. El coeficiente de correlación indica una relación débil o relativamente débil entre las variables. De acuerdo con la Tabla 2, los coeficientes de correlación indican una moderadamente altas para todos los materiales, excepto para el material con el 12% de micro-partículas y el 6% de nano-partículas donde es relativamente débil.

Tabla 2. Valores estadísticos obtenidos en el análisis de regresión de la resistencia frente a la densidad para los modelos ajustados.

Material	Modelo de regresión	<i>p</i> -valor	Confianza (%)	$R^2$ (%)	Coeficiente de correlación
Epofer	Double-reciprocal-Y	< 0,01	99	40,8	0,639
Epofer+6%SiC (10 $\mu$ m)	Reciprocal-Y	< 0,01	99	30,5	0,552
Epofer+12%SiC (10 $\mu$ m)	Square root-Y	< 0,1	90	5,3	0,229
Epofer + 6%SiC (nano)	Lineal	< 0,01	99	18,6	0,432
Epofer+12%SiC (nano)	Lineal	< 0,01	99	27,4	0,523

Igual se hace para la dureza encontrando también que hay que aplicar diferentes modelos de regresión: para el *Epofer* el modelo es el de reciprocal-Y, para los materiales con micropartículas se utiliza un modelo lineal y para los materiales con nanopartículas el double-reciprocal-Y es el modelo utilizado. En general las relaciones entre variables son débiles. Se obtiene un grado de confianza del 99% solo para el material base, para los reforzados con un 6% de partículas el grado de confianza es del 95% y para los materiales con el 12 del 90%, independientemente del tamaño de partícula.

En la Tabla 3 se presenta un resumen de las propiedades estudiadas en relación al efecto causado por el carburo de silicio en el material dependiendo de su granulometría y del porcentaje añadido. Se puede observar como en general las partículas nanométricas

disminuyen todas las propiedades, especialmente las adiciones del 12%. La dureza aumenta con las partículas micrométricas. En relación a la resistencia a flexión un tamaño de partícula menor y un mayor porcentaje disminuye la resistencia. El efecto causado por las adiciones del 12% de partículas de 10  $\mu\text{m}$  se debe fundamentalmente a la forma de las partículas (véase la Figura 1) poligonales y con grandes aristas, estas actúan como formadoras de grietas, disminuyendo la resistencia.

Tabla 3. Estudio del efecto del porcentaje y granulometría del carburo de silicio.

<i>Propiedades</i> <i>Material</i>	<i>Dureza</i>	<i>Densidad relativa</i>	<i>Resistencia a flexión</i>
Curado a temperatura ambiente	$E < D < A < B < C$ Refuerzo micro $\uparrow$ Refuerzo nano $\downarrow$	$E < A < B < D < C$ Refuerzo 12% nano $\downarrow$	$E < C < D < A < B$ Granulometría $\downarrow \Rightarrow RF$ $\downarrow$ $\% \uparrow \Rightarrow RF \downarrow$
Post-curado a 80°C	$E < D < A < B < C$ Refuerzo micro $\uparrow$ Refuerzo nano $\downarrow$	$E < A \approx D < B < C$ Refuerzo 12% nano $\downarrow$	$E < D < C < A < B$ Granulometría $\downarrow \Rightarrow RF$ $\downarrow$ $\% \uparrow \Rightarrow RF \downarrow$
Post-curado a 100°C	$E < D < A < B < C$ Refuerzo micro $\uparrow$ Refuerzo nano $\downarrow$	$E < C < D < B < A$ Refuerzo 12% $\downarrow$	$E < C < D < B < A$ Granulometría $\downarrow \Rightarrow RF$ $\downarrow$ $\% \uparrow \Rightarrow RF \downarrow$

A: Epofer. B: Epofer + 6% SiC 10 $\mu\text{m}$ . C: Epofer + 12% SiC 10 $\mu\text{m}$ . D: Epofer + 6% SiC nano. E: Epofer + 12% SiC nano

La Tabla 4 recoge un resumen de la variación de las propiedades estudiadas con el post-curado. Se puede comprobar como en las adiciones del 6% tanto en partículas nanométricas como micrométricas no hay diferencias significativas con la realización tratamiento térmico de post-curado. Sin embargo para el epoxi sin refuerzo tanto la densidad como la resistencia aumenta con la temperatura de post-curado, por lo que el grado de entrecruzamiento en el polímero debe de aumentar. En las adiciones del 12% solo en la densidad se ve un efecto con el post-curado, encontrando que disminuye para baja temperatura y aumenta para la alta, esto tiene que estar ligado con la porosidad del material. A alta temperatura se debe de producir como una pérdida del aire ocluido en el material que hace que la densidad aumente ligeramente.

Los post-curado en los materiales con adiciones del 12% de partículas nanométricas, solo producen diferencias en la resistencia y en la deformación, siendo este efecto contrario. La resistencia a flexión disminuye con la temperatura de post-curado y la deformación

aumenta; esto se debe a un efecto de plastificación que se produce en el material con la temperatura.

Microestructuralmente no se observan diferencias en los distintos materiales con el post-curado. La Figura 6 presenta las micrografías de estos materiales. Como era de esperar en una resina epoxi presenta una fractura frágil, con grandes planos de fractura en el material base (Figura 6a) y planos más pequeños en los materiales con adiciones de carburo de silicio, ya que las partículas de carburo de silicio paran el avance de la grieta y hacen que se genere en otra dirección (Figuras 6b y 6c). Debido a la baja viscosidad del polímero y el tiempo de curado (relativamente alto) las partículas de refuerzo se depositan, concentrándose en el fondo del molde. Este efecto se observa claramente con la adición de partículas nanométricas. En la Figura 6 derecha se observa una zona similar a la fractura del epoxi base (que coincide con la parte superior de la muestra) y otra zona donde la concentración de partículas es mayor. También estos materiales presentan una menor densidad, debido al mayor volumen específico de este refuerzo que hace que disminuya la viscosidad, siendo más difícil su agitación y quedando más aire ocluido en el material. Las partículas nanométricas se aglomeran formando islas dentro del material creando nanoporosidad a su alrededor. Este efecto aumenta con el porcentaje de partículas.

Tabla 4. Variación de las propiedades con el post-curado.

<i>Materiales</i> <i>Propiedades</i>	<i>Epoxi</i>	<i>+ 6% SiC nanométrico</i>	<i>+ 6% SiC 10nm</i>	<i>+ 12%SiC nanométrico</i>	<i>+ 12% SiC 10nm</i>
Densidad	100°C>80°C>T <sub>amb</sub>	SDS	SDS	SDS	80°C>T <sub>amb</sub> >100°C
Dureza	SDS	SDS	SDS	SDS	SDS
Resistencia a la flexión	100°C>80°C>T <sub>amb</sub>	SDS	SDS	100°C>80°C>T <sub>amb</sub>	SDS
Deformación	SDS	SDS	SDS	T <sub>amb</sub> >80°C>100°C	SDS

SDS: Sin diferencias significativas.

## CONCLUSIONES

La adición de partículas micrométricas al epoxi estudiado disminuye la densidad del material (se produce un aumento de la viscosidad) y aumenta la dureza (por adición de un material de alta dureza), mantiene la deformación y la resistencia a flexión se mantiene para

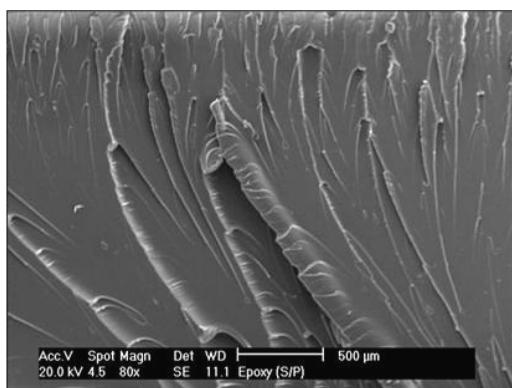
un 6% y disminuye para el 12% (las partículas actúan como generadoras de grietas).

La adición de nanopartículas de carburo de silicio disminuye en general todas las propiedades estudiadas, excepto la deformación para un 12% de adición. Esto es debido fundamentalmente al alto volumen específico de este tipo de partículas, que dificultan el crecimiento de las cadenas en el epoxi, aumentando la plasticidad.

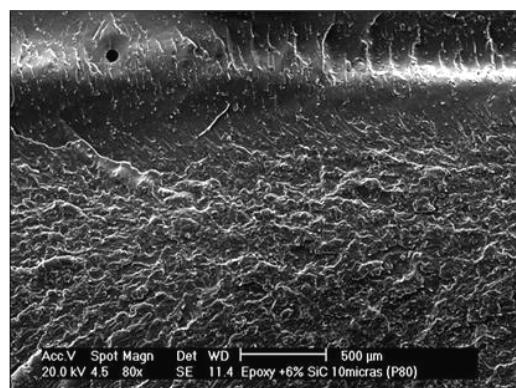
La estadística es una herramienta de análisis de resultados muy necesario para este tipo de materiales, en los que se requieren un gran número de muestras para cada ensayo, presentando los resultados experimentales una gran variabilidad.

En relación al post-curado en la mayoría de los materiales y propiedades estudiadas no hay diferencias significativas entre realizar o no el tratamiento. En el material donde se observan diferencias es el *Epofer* sin refuerzo, siendo la temperatura de 100°C la que produce una mejora notable de las propiedades.

En el análisis de regresión efectuado no se observa una fuerte relación entre la densidad y la dureza, mientras que la relación entre densidad y resistencia a flexión en casi todos los materiales moderadamente alta.



a) Epoxi (sin post-curado)



b) Epoxi+6% SiC (10μm) post-curado 80 °C



c) Epoxi + 6% SiC (nanométrico) post-curado a 100 °C

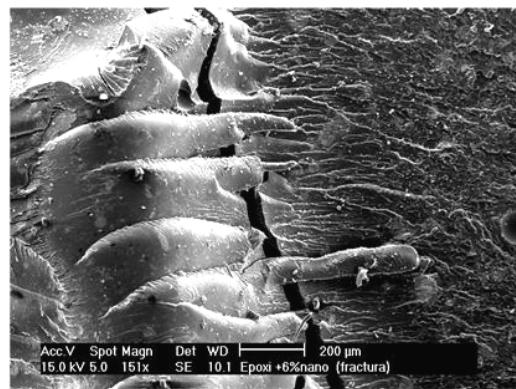


Figura 6. Micrografías de los materiales estudiados.

## BIBLIOGRAFÍA

- 1) Madrid M. *Tecnología de la adhesión*. Madrid (España): Loctite España, 2000
- 2) Agueda E, García JL. *Automoción. Elementos amovibles y fijos no estructurales*. ITES Paraninfo, 2006, <http://books.google.es> (on-line)
- 3) *FAQ, Post Curing*. Reino Unido: Resins-online, 2005, <http://www.resins-online.com/resin-online-faq.php> (on-line)
- 4) Lee JR, Park SJ, Seo MK, Baik YK, Lee SK, *Nucl. Eng. Des.*, **236**(9), 931 (2006)
- 5) Park SJ, Seo MK, Lee JR, *Nucl. Eng. Des.*, **228**(1-3), 47 (2004)
- 6) Khatua SC, Maiti S, *Eur. Polym. J.*, **38**(3), 537 (2002)
- 7) Fragni R, Zurlini C, Montanari A, Kiroplastis V, Peñalba F, *Prog. Org. Coat.*, **55**(3), 254 (2006)
- 8) Miettinen VM, Narva KK, Vallittu PK, *Biomaterials*, **20**(13), 1187 (1999)
- 9) Liétard V, Krawczak P, Pabiot J, *Eur. Polym. J.*, **36**(3), 555 (2000)
- 10) Vallittu PK, Ruyter IE, Buykuilmaz S, *Eur. J. Oral Sci.*, **106**(1), 588 (1998)
- 11) Montgomery DC, Runger GC “*Applied Statistics and Probability for Engineers*”. John Wiley, Nueva York, 2003
- 12) Katime I “*Química Física Macromolecular*”. Servicio Editorial del País Vasco. Bilbao 1994
- 13) Towse A, Potter KD, Wisnom MR, Adams RD, *Int. J. Adhes. Adhes.*, **19**(1) 71 (1999)
- 14) Seo DW, Lim JK, *Compos. Sci. Technol.*, **65**(9), 1421 (2005)
- 15) Pantoja M, Abenojar J, Velasco F, Martínez MA, Durbán M, *J. Adhes. Sci. Technol.*, **21**(11), 1045 (2007)
- 16) *Ficha de datos técnicos y Seguridad de Feroca*. Madrid (España): Feroca Composites, <http://www.feroca.com/soporte.asp> (on-line)