

# ***CAPÍTULO VII***

## ***CONCLUSIONES***



## 7. CONCLUSIONES

### 7.1. CONCLUSIONES

1. Los hidróxidos de magnesio y de aluminio presentan una actividad de nucleación de la forma  $\alpha$  de la fase cristalina del polipropileno. Esta actividad se hace muy notable para materiales obtenidos mediante moldeo por inyección, al facilitarse la cristalización del PP en condiciones de enfriamiento rápido. La cizalla existente en la interfaz partícula-PP fundido durante el proceso de inyección también contribuye a una mayor cristalinidad.
2. La aplicación de un tratamiento superficial de tipo lubricante sobre la superficie de las partículas de hidróxido de magnesio resulta en la aparición de la fase  $\beta$  del polipropileno, al limitarse la actividad de nucleación de la fase  $\alpha$ .
3. El hidróxido de aluminio presenta una mayor actividad de nucleación que el hidróxido de magnesio, debido, probablemente, a una mayor similitud entre el cristal de hidróxido y la fase cristalina  $\alpha$  del polipropileno.

4. La actividad de nucleación de los hidróxidos resulta en un aumento de la rigidez, de la resistencia mecánica, de la resistencia térmica, de la resistencia a la propagación de grieta del polipropileno inyectado, incluso con bajas concentraciones de carga mineral (2%).
5. El proceso de moldeo por inyección induce un cierto nivel de anisotropía en las piezas producidas al orientarse el material en las zonas cercanas a la superficie, debido al importante gradiente de velocidad existente en esta región. Esta anisotropía de la estructura piel-núcleo se traduce por una anisotropía de la respuesta mecánica del material. De un modo general, la piel de los materiales inyectados se caracteriza por una mayor rigidez, un comportamiento menos visco-elástico y una menor movilidad de la fase amorfa.
6. Las partículas laminares de hidróxido tienden a orientarse en la región cercana a la superficie de la muestra y paralelamente a esta superficie. Se ha visto que la fase cristalina inducida por la presencia de carga mineral se orienta paralelamente a las partículas. Por debajo del 20% en peso de hidróxido de magnesio, la orientación de las macromoléculas de PP no se ve afectada por la presencia de las partículas de hidróxido. Por encima de esta concentración límite, las orientaciones de la fase cristalina de la matriz y de las partículas son directamente relacionadas.
7. El grado de orientación de las partículas es función de la fluidez del fundido. Una baja fluidez resulta en una reducción del gradiente de velocidad y por lo tanto de la orientación del material.
8. La incorporación de hidróxido de magnesio o de aluminio resulta en un aumento de la rigidez y una reducción de la resistencia a la tracción y de la deformación. Para altos contenidos de hidróxido de magnesio no tratado, el aumento de la rigidez se puede predecir utilizando el modelo de Tsai-Halpin.
9. Los micromecanismos de deformación plástica evolucionan con el contenido de carga mineral. Para el material sin cargar o con concentraciones bajas de hidróxido, la cedencia por bandas de cizalla es el mecanismo principal, mientras que para materiales altamente cargados, la deformación plástica se debe esencialmente al despegue de la interfaz partícula-matriz. Para concentraciones intermedias, ambos

mecanismos de deformación contribuyen al proceso de cavitación del material, al deformarse la matriz por cedencia por cizalla una vez la interfaz se ha despegado.

10. La resistencia al impacto ha podido ser caracterizada mediante la Mecánica de la Fractura Elástico-Lineal en el caso de los materiales no tratados. La presencia de un 40% en peso de partículas rígidas no tratadas no influye significativamente sobre el valor de la tenacidad de fractura, mientras que la energía de fractura disminuye con el contenido de carga mineral, debido a la mayor rigidez de los compuestos cargados.
11. La utilización de unas partículas de hidróxido de magnesio con tratamiento superficial lubricante favorece el desarrollo de una deformación plástica importante, la cual impide la aplicación de la Mecánica de la Fractura. Se ha podido, sin embargo, observar que la menor restricción al flujo plástico de la matriz, así como la existencia de la fase  $\beta$  del polipropileno, inducen un aumento de la energía de fractura del material.
12. El comportamiento a la fractura a baja velocidad de deformación se ha podido caracterizar mediante la aplicación de la integral  $J$  al cumplirse las condiciones de deformación plana. Sin embargo, la fractura del polipropileno homopolímero sin cargar se ha singularizado por una propagación inestable de la grieta, por lo que no se ha podido aplicar la Mecánica de la Fractura Elastoplástica.
13. Se ha comprobado que la carga aplicada es separable para todos los materiales preparados, cuando se ha podido asegurar unas longitudes de grieta estables. Este requerimiento no se ha podido cumplir para el material cargado con 60% en peso de hidróxido de magnesio sin tratar.
14. El método de normalización de la carga ha aparecido ser un método muy valioso para la determinación de la curva de resistencia  $J$ - $R$  de los materiales estudiados. Los únicos materiales para los cuales no se ha podido aplicar este método han sido los materiales presentando una zona de deformación plástica de tamaño muy reducido, para los cuales el concepto de integral  $J$  no es válido. Para estos materiales, la grieta empieza a propagarse durante la transición entre régimen elástico y régimen plástico, donde la carga no es separable.

15. La función de deformación puede ser adecuadamente descrita por una ley potencial. Se ha observado que la adecuada descripción de la deformación de la punta de la grieta debida al enromamiento es esencial para la correcta aplicación del método de normalización. En este sentido, se ha observado que un factor de restricción plástica de  $m_{pc} = \sqrt{3}$  resulta en una buena descripción del enromamiento de la punta de la grieta de los materiales preparados.
16. La modificación de la estructura cristalina de la matriz resulta en una mayor resistencia a la propagación de grieta del material, a baja velocidad de deformación. Porcentajes de carga mayores al 20% implican una caída importante de los valores de los parámetros de fractura, debido a la restricción del flujo plástico.
17. El tratamiento superficial de las partículas de hidróxido de magnesio resulta en una resistencia a la fractura mayor que la matriz sin cargar o cargada con bajos contenidos de hidróxido sin tratar. La existencia de la fase  $\beta$  y sobretodo la menor inmovilización del polímero en la interfaz partícula/matriz resultan en un importante proceso de cavitación, absorbiendo una gran cantidad de energía.

## **7.2. ASPECTOS ABIERTOS A LA INVESTIGACIÓN**

### Sistemas polipropileno/hidróxidos de magnesio y de aluminio:

Considerando las importantes modificaciones de las propiedades mecánicas al incorporar la cantidad de hidróxido necesaria para una ignifugación completa, se propone:

- Estudiar la posibilidad de incrementar las propiedades iniciales de la matriz de manera a obtener mejores propiedades del compuesto (sistemas ternarios).
- Limitar el contenido de hidróxido y completar la ignifugación del PP mediante la adición de otro Ignifugante, con posible efecto sinérgico (borato de zinc, melamina,...).

Método de normalización de la carga:

Aunque el método de normalización ha sido aplicado con éxito para la construcción de la curva de resistencia de diferentes materiales en base a polipropileno, hace falta todavía mucho trabajo para el uso generalizado de este método en substitución al método de múltiple probeta. Para ello, se propone:

- Evaluación del protocolo de aplicación del método de normalización de la carga para otros materiales.
- Estudio y modelización del proceso de enromamiento de la punta de la grieta, debido a la importante influencia que tiene este proceso sobre la parte inicial de la curva  $J$ - $R$  determinada.
- Estudio de la posibilidad de relacionar la tendencia decreciente del valor del parámetro de separación,  $S_{pb}$ , frente al desplazamiento plástico con el incremento de longitud de grieta equivalente al enromamiento,  $\Delta a_b$ .
- Estudio de las variaciones del valor de  $\eta_{pl}$  con el coeficiente de endurecimiento  $n$  de la ecuación de Ramberg-Osgood.

