

ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO POR MEB DE COMPACTOS OBTENIDOS DE DESECHOS Y RESIDUOS SÓLIDOS DE ORIGEN DOMÉSTICOS

R. Sánchez^a, F. Franco^b, S. Camero^{b*}, A. Molina^c, S. García^b

^aUniversidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil. Caracas-Venezuela 1053, rebeaucv@gmail.com; ^bUniversidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, Caracas-Venezuela 1053, franciamargarita@gmail.com, soniacamero@gmail.com, shmuel@cantv.net; ^cUniversidad Simón Bolívar. Departamento de Ciencia de los Materiales. Caracas-Venezuela 1080A, amolina@usb.ve.

*Autor de Correspondencia: soniacamero@gmail.com, telef: 0212-6051027; fax: 0212-6051515

Recibido: Agosto 2012. Aprobado: Noviembre 2012.

Publicado: Enero 2013.

RESUMEN

Se realizó un análisis fractográfico de compactos cilíndricos mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), de un material compuesto de matriz polimérica con particulado fino y grueso, ensayado a compresión, obtenido a partir de la fracción en seco de desechos y residuos sólidos de origen doméstico (metales, cerámicos, polímeros y cartón), procesados mediante mezclado en seco, tamizado y prensado en caliente. El análisis del material con ambos particulados reveló la fragmentación de sus constituyentes por los esfuerzos aplicados, haciendo posible el flujo de la matriz conjuntamente con las partículas fracturadas, con planos orientados a 45° de la superficie del material para el particulado fino y con planos más suaves y compactos, orientados perpendicular al esfuerzo de compresión (abarrilamiento), para el particulado grueso. Las propiedades mecánicas a compresión, resultaron mayores en los compactos de particulado grueso, lo cual es coherente con las características de las superficies de fractura observadas, asociadas al modo de falla de agrietamiento (particulado fino) y abarrilamiento (particulado grueso). Este comportamiento puede ser atribuido, entre otros factores, a las mejores condiciones de flujo del polímero fundido del compacto de particulado grueso, alcanzando una mejor cohesión entre la matriz polimérica y las partículas (vidrio, metal, cerámico, cartón), lograda gracias al comportamiento viscoelástico y reológico de la mezcla de polímeros que conforman la matriz. Las propiedades mecánicas de compresión del material caracterizado sustenta la posibilidad de desarrollar nuevos materiales potenciales, a partir de desechos y residuos sólidos domésticos, permitiendo además reducir el impacto ambiental vinculado con el proceso general de manufactura.

Palabras clave: desechos, residuos sólidos, fractografía, material compuesto, propiedades mecánicas

SEM FRACTOGRAPHIC ANALYSIS OF COMPACTS OBTAINED BY WASTES AND SOLID WASTES OF DOMESTIC ORIGIN

Fractographic analysis was performed on cylindrical compact by Scanning Electron Microscopy (SEM) of a polymer matrix composite material with fine and coarse particulate, tested in compression, obtained from the dry fraction of waste and solid waste of domestic origin (metals, ceramics, polymers and cardboard), processed by dry mixing, sieving and hot pressing. The analysis of both particulate material showed the fragmentation of its constituents by the applied stress, allowing the flow of the matrix together with the fractured particles, with planes oriented at 45 ° from the surface of fine particulate material to the drawings and more smooth and compact, oriented perpendicular to the compression stress (barreling) for coarse particulate. Compressive mechanical properties, were higher in coarse particulate compact, which is consistent with the characteristics of the observed fracture surfaces, associated with the failure mode of cracking (fine particles) and barreling (coarse particulate). This behavior can be attributed, among other factors, to the best possible flow of molten polymer of coarse particulate compact, reaching a better cohesion between the polymer matrix and particles (glass, metal, ceramic, cardboard), achieved through viscoelastic and rheology behavior of the polymer blend forming the matrix. The mechanical properties of compression of the material characterized supports the possibility of developing new materials potential from waste and domestic waste, allowing further reduce the environmental impact associated with the overall process of manufacturing.

Palabras clave: waste, solid waste, fractography, composite material, mechanical properties.

INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento, manejo adecuado y disposición segura de los desechos y residuos sólidos generados en la diversidad de actividades humanas, constituye un foco de atención prioritaria a nivel mundial, siendo los de origen domésticos unos de los más complejos por la heterogeneidad de sus constituyentes y potencialidad de impacto sanitario y ambiental. [1-3]

Ante esta problemática, los lineamientos para el manejo de los desechos sólidos están centrados en la recuperación, re-uso y reciclaje de materiales, destrucción térmica con o sin aprovechamiento de energía, conversión de los materiales biodegradables en abono orgánico y disposición final segura de los materiales inertes no aprovechables.[4] Sin embargo, el análisis de estas opciones a la luz de las implicaciones sociales, ambientales, técnicas y económicas, especialmente en los países emergentes, dificultan su implantación dentro de las cuales destacan:[5-7] alto consumo energético, generación de subproductos de alto impacto sanitario y ambiental, requerimientos de mantenimiento intensivo, insuficiencia económico-financiera, eficiencia productiva cuestionada, distorsión social asociada a la recuperación de materiales.

Se han planteado diferentes opciones para la utilización y aprovechamiento de los desechos sólidos, dentro de las cuales destacan: la recuperación de energía, elaboración de abonos orgánicos “compost” para su uso como acondicionador de suelos, recuperación de materiales a ser incorporados a procesos industriales, para transformación de nuevos productos y algunos estudios se han enfocado en el desarrollo de nuevos materiales para diversas aplicaciones, entre ellos materiales compuestos, para la industria de la construcción.[8-10]

Es bien conocido, que en general, los materiales compuestos ofrecen una serie de ventajas con respecto a los tradicionales, aportando numerosas cualidades funcionales: ligereza, resistencia mecánica y química, mantenimiento reducido, libertad de formas, rigidez,

tenacidad a temperatura ambiente y a altas temperaturas, entre otras, siendo el propósito de los refuerzos en una matriz polimérica, mejorar su rigidez y resistencia mecánica y en ciertos casos su tenacidad.[11] La importancia de los materiales compuestos se evidencia cuando se considera el módulo de elasticidad por unidad de peso (módulo específico) y la tensión máxima soportada por unidad de peso (resistencia específica). Valores mayores en estas propiedades, implican una reducción en el peso de los componentes, factor de suma importancia en todas las formas de transporte, donde las reducciones de peso dan como resultado un mayor rendimiento y ahorro de energía [12,13]. Otros sectores donde estos materiales han encontrado importante aplicación son la fabricación de artículos deportivos, electrodomésticos y en la industria química. Sin embargo se conoce que las propiedades mecánicas de los materiales compuestos dependen de cada una de las fases que lo conforman y de las interfaces, así como de su fracción volumétrica, geometría y distribución espacial en el seno del compuesto. A menudo, las propiedades óptimas se ven limitadas por la aparición de fenómenos que generan daño del material compuesto, como la rotura de los refuerzos y de la matriz ó la descohesión a lo largo de las interfaces. La predicción de sus propiedades mecánicas a partir de aquellas de sus componentes y de su geometría, requiere desarrollar modelos micromecánicos de comportamiento que permitan conocer la relación entre la microestructura del material y su comportamiento macroscópico, incluyendo los efectos del daño. Este tipo de modelos permiten entender mejor los mecanismos de deformación y rotura del material actual y proceder a introducir modificaciones en su diseño a fin de obtener un material óptimo para la aplicación deseada.[14-16] Aun cuando se reconoce la importancia de abordar este aspecto, su desarrollo escapa al alcance de este estudio. Con base en estos planteamientos, se propone la caracterización mecánica de un material compuesto de matriz polimérica con particulado fino y

grueso, ensayado a compresión, obtenido a partir de la fracción en seco de desechos y residuos sólidos de origen doméstico (metales, cerámicos, polímeros y cartón), procesados mediante mezclado en seco, tamizado y prensado en caliente.

MATERIALES Y MÉTODOS

Conformación del compacto

Los cilindros compactos fueron obtenidos a partir de la fracción seca de desechos y residuos sólidos de origen doméstico, recolectados de tres residencias de niveles económicos estándares, durante ocho días continuos, siendo la distribución porcentual de constituyentes: 6% metales, 29% polímeros, 43% vidrios y cerámicos y cartón 22%. Estas fracciones fueron procesadas mediante las siguientes etapas:

Obtención de virutas: Las virutas de los metales se obtuvieron con un taladro vertical, utilizando una broca de 7/32" para acero y madera. Los diferentes polímeros (plásticos) y cartón de los residuos sólidos domésticos fueron cortados y luego triturados con un equipo de aspa y motor. Los diferentes vidrios fueron triturados manualmente utilizando un martillo.

Mezclado en seco: Cada uno de los materiales cortados, triturados o desmenuzados por separado, se mezcló en un molino de bolas de marca General Electric (A-C Motor), por un período de 1 hora.

Tamizado: Los diversos constituyentes fueron tamizados por separado, en un tamizador convencional, tipo Rop-Tap Testing Sieve Shaker, Model B, Tyler Industrial Products, compuesto de tamices de acero inoxidable con vibración mecánica de alta frecuencia, descarga vertical por vía seca, por un período de 5 minutos (metales), 20 minutos (polímeros) y 10 minutos (vidrios), utilizando la serie de tamices con malla: 8, 40, 70, 100, 120, 170, 200 y 400 para los polímeros y vidrios, y la serie de tamices de malla: 8, 30, 70, 100, 120, 200 y 400 para los metales.

Mezcla de constituyentes: Se prepararon mezclas de los constituyentes provenientes de los tamices de

granulometría fina (mallas 70, 100, 120, 170, 200 y 400), así como de los provenientes de los tamices de granulometría gruesa (mallas 8, 30 y 40), utilizando las proporciones de los diferentes constituyentes en la corriente de residuos. Esto permitió preparar dos tipos de mezclas designadas como materiales de particulado fino y grueso.

Prensado: Las mezclas obtenidas se prensaron a una temperatura de 150 °C, aplicando una presión de 59,97 MP (8697,57 Psi). Se realizó un pre-calentamiento por dos minutos, luego el calentamiento con presión por seis minutos y la refrigeración del equipo por siete minutos, logrando así los cilindros compactos para el ensayo a compresión, tanto de particulado fino como de particulado grueso.

Caracterización morfológica y química

Estudios previos [17] mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y microanálisis químico por EDS de las muestras, previamente tamizadas, permitió revelar la presencia de partículas finas y gruesas, con morfología variadas y de diferente composición química. Se alcanzaron tamaños de partículas finas y gruesas de naturaleza metálica (finas desde 440 hasta 990 μm y gruesas mayores a 990 μm hasta 2800 μm) ricas principalmente en Al y Fe, partículas poliméricas (finas desde 390 μm hasta 920 μm y gruesas mayores a 920 hasta 1790 μm) constituidas principalmente por C y O, partículas de vidrio y cerámicas (finas desde 360 μm hasta 730 μm y gruesas mayores 730 μm hasta 1890 μm) con Si y O, así como de cartón con presencia de C y O. Este estudio [17] además, presenta una caracterización rigurosa por M.E.B. y microanálisis químico por E.D.S. de las muestras provenientes de residuos sólidos tratadas, mezcladas y compactadas de partículas finas, revelando una superficie homogénea constituida mayoritariamente por: C, O y Si y en menor proporción: Na, Ca, Cl, Al, Ti, K, Mg, Cu, Fe, As; mientras que en los compactos provenientes de las partículas gruesas, se observó una superficie irregular, con contenidos mayoritarios de

elementos tales como: C y O y en menor proporción: Si, Na, Ca, Cl, Al, Ti, K, Mg, Cu, Fe y Br.

Ensayo mecánico de compresión

Para el ensayo mecánico de compresión se ensayaron (4) cuatro muestras de materiales finos y gruesos, respectivamente, de acuerdo a las dimensiones establecidas en la norma ASTM 695-02 [18], donde la relación de la altura es dos veces el diámetro (1:2). Para este ensayo se utilizaron probetas de diámetro 2,5 cm por una altura de 4,7 cm aproximadamente. El ensayo se realizó en una máquina universal, marca MTS Systems Corporation, modelo 661.23A-01, con una carga máxima de 25 TM, a una velocidad de 1mm/min.

Análisis fractográfico

Las superficies de las muestras ensayadas a compresión fueron caracterizadas mediante un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB), marca Hitachi, modelo S-2400, 20 kV.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ensayo mecánico de compresión

Tabla 1. Propiedades mecánicas de los compactos sometidos a compresión.

Material compuesto	Esfuerzo de fluencia, σ_y (MPa)	Esfuerzo máximo σ_{max} (MPa)	Módulo de Young (MPa)
Particulado fino (μm) *. Metales: 440 hasta 990 *. Polímero: 390 hasta 920 *. Vidrio -cerámicas: 360 hasta 730	1663,21	1805,32	45.021
Particulado grueso *. Metales: >990 hasta 2800 *. Polímero: > 920 hasta 1790 *. Vidrio -cerámicas: > 730-1890	1949,03	2000,42	47.468

En las Figuras 1a y 1b, se muestran las curvas de esfuerzo σ (MPa) versus deformación ϵ , obtenidas del ensayo de compresión de los compactos de particulados finos y gruesos, respectivamente y en la Tabla 1 se resumen los valores obtenidos a partir de estas curvas.

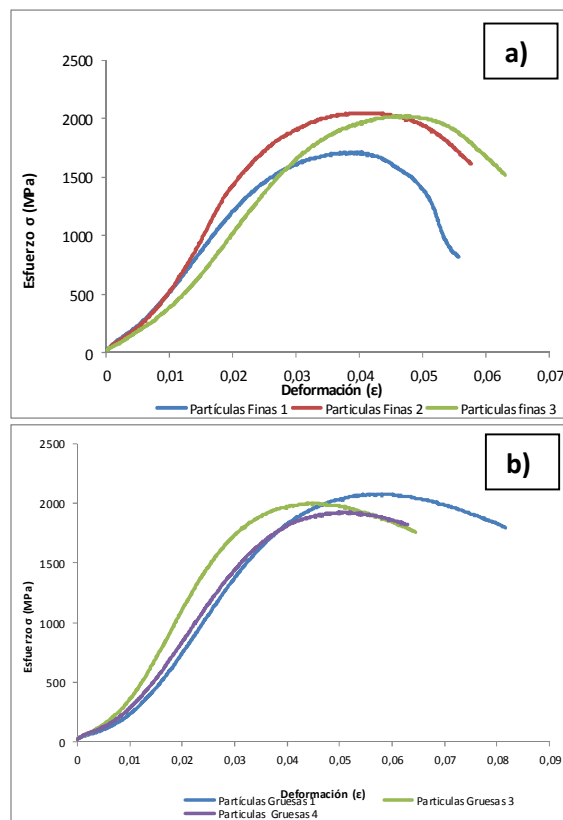


Fig. 1. Curva esfuerzo versus deformación del material compuesto sometido a compresión: a) Particulado fino y b) Particulado grueso.

Considerando la forma que presentan las curvas y teniendo en cuenta la estructura química de los polímeros que conforman la matriz polimérica (termoplásticos), pudiera inferirse que a pesar de observarse una zona de comportamiento elástico, pareciera que, como es característico de los polímeros, la deformación elástica y la plástica se están dando casi al mismo tiempo.

En una primera fase de aplicación de la carga a compresión, el esfuerzo aplicado ocasiona que los enlaces covalentes dentro de las cadenas poliméricas se comprimen y distorsionen, permitiendo que las cadenas se alarguen de manera elástica. Cuando se elimina el

esfuerzo la recuperación de esta distorsión es casi instantánea. Además, pueden distorsionarse segmentos enteros de las cadenas de polímeros. Si se eliminara el esfuerzo, los segmentos vuelven a sus posiciones originales sólo después de un cierto tiempo, con frecuencia de horas e incluso meses. Este comportamiento dependiente del tiempo o viscoelástico, puede contribuir a algún comportamiento elástico no lineal.

Por otra parte, cuando el material es amorfo, las cadenas se comprimen, rotan, se deslizan y se desenredan o enderezan bajo una carga para ocasionar una deformación permanente (comportamiento plástico). También ocurre compresión, permitiendo el deslizamiento continuo de las cadenas a un esfuerzo menor. Sin embargo con el tiempo las cadenas se vuelven casi paralelas y se aproximan más unas a otras; el enlace de Van der Waals más intenso entre las cadenas que se encuentran alineadas más cercas requiere de esfuerzos mayores para completar la deformación y el proceso de fractura. Es decir se genera un tipo de cristalización debido a la orientación.

Cuando se trata de materiales semicristalinos, las cadenas de polímeros en la región cristalina se extienden hacia regiones amorfas como cadenas de unión. Cuando se le aplica una carga de compresión al polímero, las laminillas cristalinas dentro de las esferulitas se deslizan entre si y comienzan a separarse a medida que las cadenas de unión se comprimen. Los pliegues en las laminillas se inclinan y se alinean con la dirección de la carga a compresión.

Las laminillas cristalinas se rompen en unidades más pequeñas y se deslizan entre si hasta que con el tiempo el polímero está compuesto de cristales pequeños alineados unidos por las cadenas de unión y orientadas paralelamente a la carga de compresión. Las esferulitas también cambian de forma y alinean en la dirección del esfuerzo aplicado. Ante un esfuerzo continuo las cadenas de unión se desenredan o rompen ocasionando que el polímero falle.

El comportamiento mecánico del material bajo estudio cuando se somete a compresión está basado en la

respuesta que puede ofrecer un material compuesto de matriz polimérica tipo termoplástico, el cual presenta cadenas independientes entre sí, es decir, no existen uniones químicas fuertes entre ellas, por lo que su estructura es como un entrecruzamiento de cadenas. Al calentarse y someterse a esfuerzos, permiten que las cadenas se deslicen y resbalen unas sobre otras adquiriendo el mencionado estado viscoelástico, por lo que pueden ser moldeados a presión. Su propiedad fundamental es que por encima de su temperatura de transición vítrea (T_g), las cadenas que lo conforman adquieren la suficiente energía como para deslizarse unas sobre otras de tal manera que el polímero se deforma. Por otro lado, estos polímeros pueden ser amorfos con macromoléculas unidas por enlaces intermoleculares, las cuales se posicionan de forma desordenada o entrelazada y pueden ser semicristalinos, cuyas macromoléculas tienen zonas donde se alinean, se pliegan sobre sí mismas, formando pequeños cristales dentro de la matriz amorfa, ofreciendo de esta manera mayor resistencia mecánica y rigidez que el termoplástico amorfo.

En síntesis, la estructura química de los polímeros que conforman la fase continua matriz, constituye un factor fundamental en el proceso de conformación del compacto. El comportamiento viscoelástico de estos polímeros favorece el proceso de cohesión entre las partículas y la matriz, logrando una buena adherencia en la interface. Las partículas de refuerzo que en este caso presenta geometría (forma, tamaño, distribución y orientación) diversa, cumple con el rol de restringir el movimiento de la fase matriz en las proximidades de cada partícula, permitiendo que la matriz transfiera parte de la carga aplicada a las partículas, las cuales soportan una fracción de la carga. [19]

En el caso de los compactos preparados con los diferentes constituyentes de la fracción reciclable seca, presente en los residuos sólidos domésticos, el tamaño de las partículas parece influir en el comportamiento mecánico de los compacto. Consistentemente, los resultados más

favorables se obtienen para el compacto preparado con partículas gruesas.

A partir de las curvas esfuerzo versus deformación a compresión, se determinó el Módulo de Young (pendiente de la zona recta de la curva, $E = \Delta\sigma/\Delta\varepsilon$), el esfuerzo máximo (σ_{max}) y el esfuerzo de fluencia ó límite elástico (σ_y), obteniéndose valores mayores para los tres parámetros considerados en el caso de los compactos preparados con partículas gruesas, (Tabla 1). Estos resultados sugieren una mayor adherencia entre la matriz polimérica termoplástica y las partículas de vidrio y metal, así como las fibras de cartón, provenientes de los constituyentes de la fracción de reciclables secos, presentes en los residuos sólidos de origen doméstico. Esto confirma la idea de que las partículas gruesas ofrecen mejores condiciones de flujo del plástico fundido y en consecuencia mejores condiciones para lograr la adherencia entre las partículas. Este comportamiento es coherente con las características observadas en el modo de fractura de las probetas ensayadas. Así, el material compuesto de particulado grueso, no presentó un plano específico de fractura como en el caso del material conformado por partículas finas, en el cual se observó agrietamiento a un ángulo de 45°, si no que se observó “abarrilamiento”, sin llegar a fracturarse, lo cual evidencia su mayor resistencia a la compresión y por ende sustenta la presencia de enlaces más fuertes, ofreciendo de esta manera una mayor integridad mecánica.

Por otra parte conviene señalar que aun cuando no es posible ubicar el material obtenido, en los diagramas de propiedades reportadas [20], donde se establecen los dominios del Módulo de Young versus densidad, para diversas clases de materiales de ingeniería, pues la densidad es baja (aproximadamente 1,35 g/cm³), el Módulo de Young de los compactos obtenidos resultaron mayores que los reportados para la espumas duras, materiales poliméricos en general y algunos materiales naturales, incluyendo la madera, siendo comparable con el reportado para algunas aleaciones metálica.[20]

Asimismo cuando se compara el esfuerzo de fluencia obtenido con los valores reportados para algunos tipos de materiales,[21] éstos son abarcados por el espectro mostrado para materiales metálicos y poliméricos.

Análisis fractográfico

El análisis de la superficie de fractura mediante MEB del material compuesto de particulado fino y grueso, reveló la fragmentación de los distintos constituyentes del material, generada por los esfuerzos aplicados, haciendo posible el flujo de la matriz conjuntamente con las partículas fracturadas. Se observa una superficie constituida por planos orientados a 45° de la superficie del material (Figura 2a-2e) para el particulado fino y una superficie conformada por planos de textura más suaves y compactos, orientados mayoritariamente perpendicular al esfuerzo de compresión aplicado, para el particulado grueso (Figura 3a-3e, abarrilamiento).

Como ya ha sido descrito, los valores de las propiedades mecánicas a compresión, resultaron mayores en los compactos de particulado grueso que en los de particulado fino, lo cual es coherente con las características de las superficies de fractura observadas por MEB, asociadas al modo de falla presentado en cada caso: agrietamiento (particulado fino) y abarrilamiento (particulado grueso).

El análisis fractográfico evidencia la fluencia sufrida por el material por efecto del esfuerzo aplicado de compresión, es decir logra mantener unidos entre si matriz y particulado, fortaleciendo una buena cohesión entre ellas y permitiendo conservar de esta manera su integridad estructural.

Es importante resaltar que mientras el compuesto de particulado fino presentó agrietamiento a 45° de la superficie sometida a compresión, las muestras de particulado grueso no presentaron un plano específico de fractura, sino sufrieron un severo abarrilamiento, es decir el compacto no llegó a fracturarse, por lo tanto estas superficies analizadas corresponden a un corte transversal de la muestra con respecto a la dirección del esfuerzo aplicado, a partir de las cuales se observan los

constituyentes formando planos compactados, lo cual sugiere una mayor adherencia entre la matriz y las partículas, ofreciendo de esta manera enlaces más fuertes

que garantizan una mayor integridad mecánica que la presentada por el compacto de particulado fino.

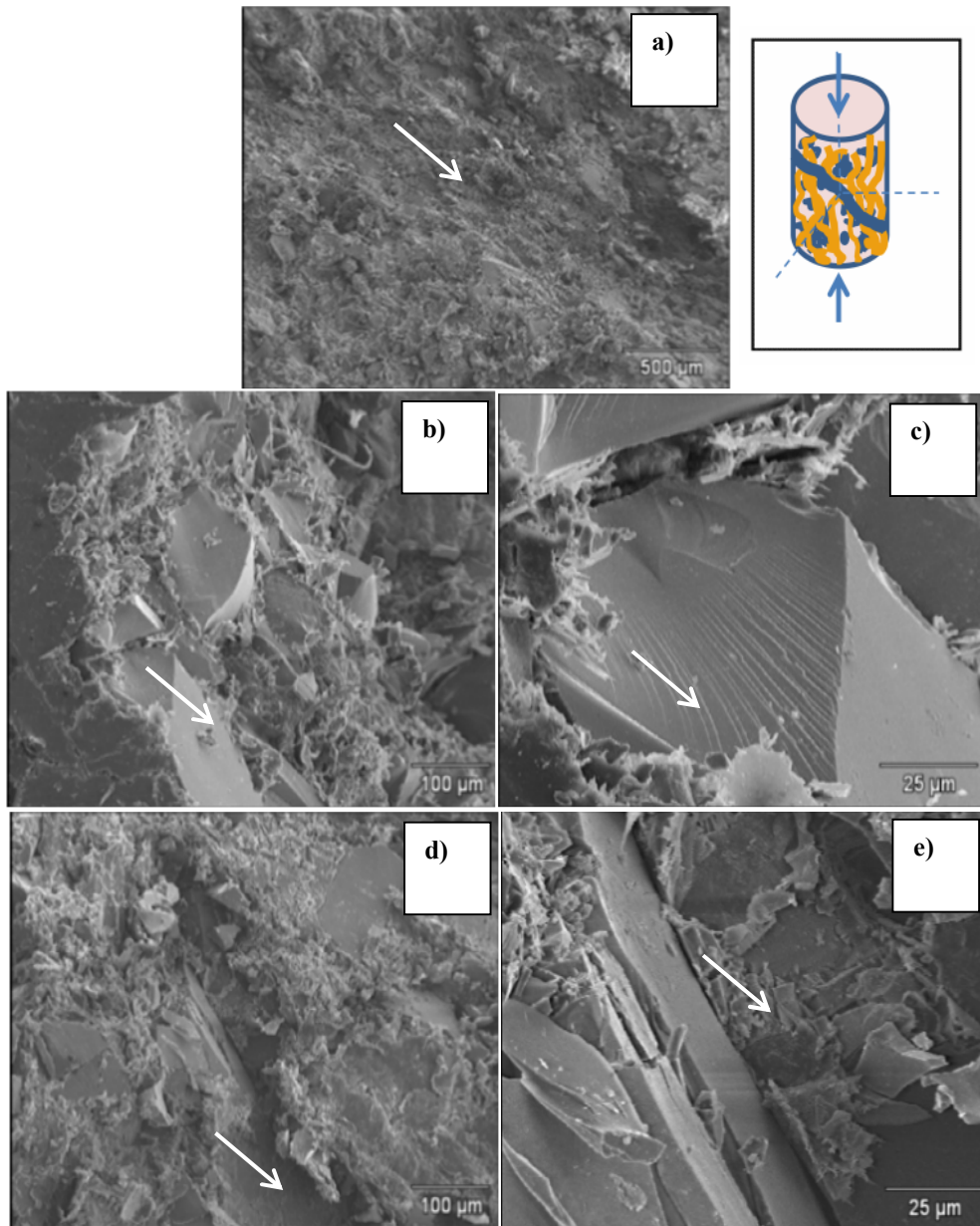


Fig. 2. Fotomicrografías por MEB del compacto conformado a partir de partículas finas, mostrando la superficie de fractura. Se observan superficies con planos orientados a 45° (indicado por las flechas blancas) del esfuerzo de compresión aplicado, como se ilustra en el recuadro superior derecho: a) Vista general 20X, b) y d) Detalles 80X, c) y e) Detalles de anterior 400X.

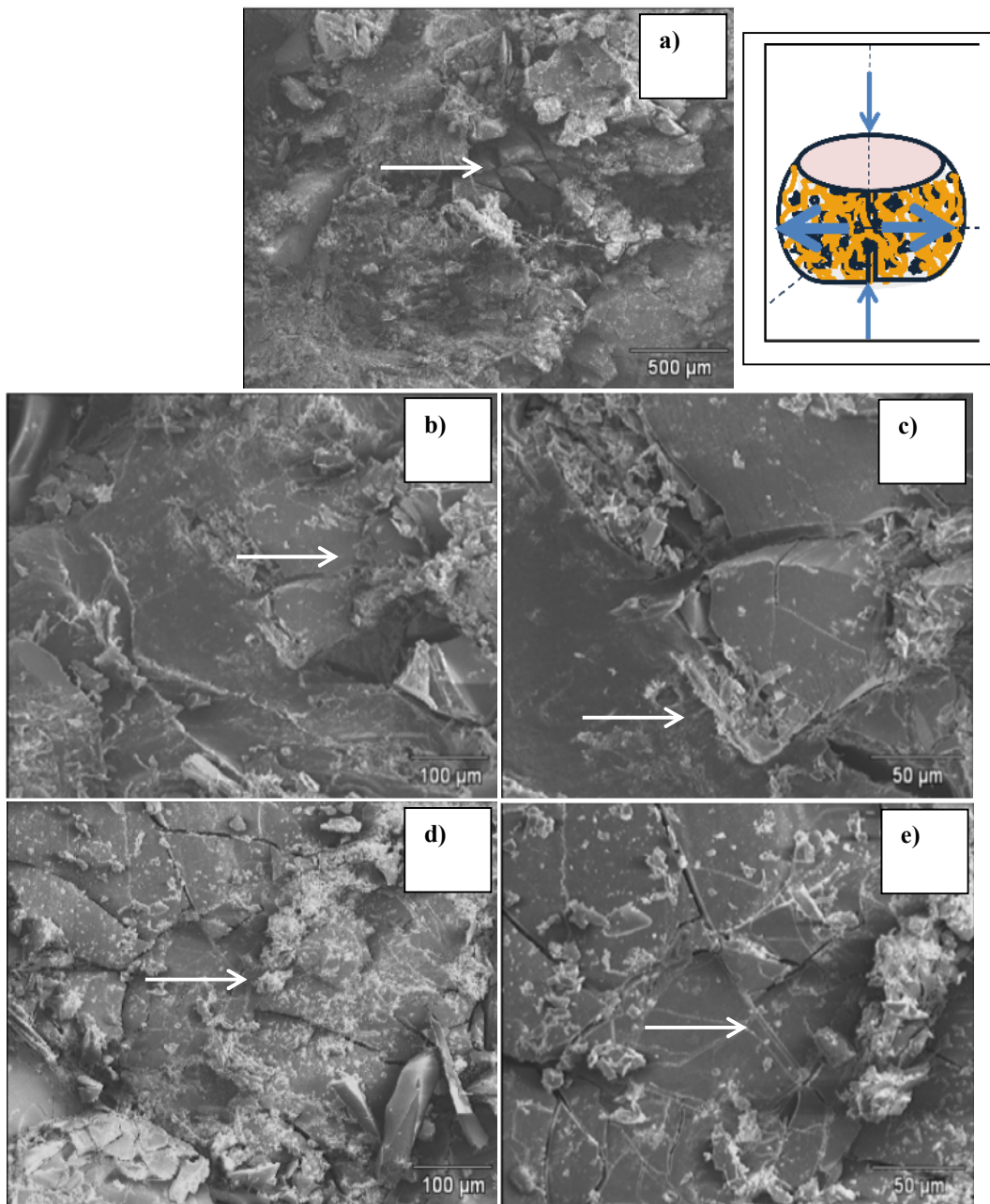


Fig. 3. Fotomicrografías por MEB del compacto conformado a partir de partículas gruesas, mostrando la superficie de fractura. Se observan superficies predominantemente planas, fragmentadas, formando 90° (indicado por las flechas blancas) con respecto al esfuerzo aplicado, como se ilustra en el recuadro superior derecho: a) Vista general 20X, b) y d) Detalles 80X, c) y e) Detalles de anterior 200X.

Los valores de las propiedades mecánicas de compresión (esfuerzo de fluencia, resistencia máxima a la compresión y módulo de elasticidad) resultaron mayores en los compactos de particulado grueso, comparadas con las obtenidas en las muestras de particulado fino, lo cual

es coherente con las características de las superficies de fractura observadas por MEB, asociadas al modo de falla presentado en cada caso. Este comportamiento puede ser atribuido, entre otros factores, a que el compacto de particulado grueso ofrece mejores condiciones de flujo

del polímero fundido en comparación con el compacto de particulado fino, alcanzando una mejor cohesión entre la matriz polimérica y las partículas (vidrio, metal, cerámico, cartón), lograda gracias al comportamiento viscoelástico y reológico de la mezcla de polímeros que conforman la matriz.

Es evidente, que para que la adhesión ocurra durante la fabricación del material compuesto la matriz y el refuerzo deben presentar un íntimo contacto, pudiendo la matriz estar en una condición en la cual es capaz de fluir y su comportamiento se aproxima al de un líquido.

Es bien conocido [22,23] que la interfase matriz-refuerzo condiciona las propiedades mecánicas finales de los materiales compuestos. La transmisión y reparto de las cargas aplicadas al material compuesto se efectúa por la unión existente entre matriz y refuerzo. Si la unión no es buena, la matriz soportará la mayor parte de las tensiones y la función de los refuerzos será nula. La interfase es, pues, una región de composición química variable, que constituye la unión entre la matriz y el refuerzo, y que asegura la transferencia de las cargas aplicadas entre ambos, siendo los principales parámetros necesarios para obtener una interfase "ideal": [23]

- El mojado (entendiendo como mojado la aptitud de un líquido a extenderse sobre un sólido, propiedad de alto interés cuando el conformado pasa por la infiltración de una preforma-refuerzo por un fundido-matriz) entre la matriz y el material de refuerzo debe ser bueno. Aquí interviene la naturaleza termodinámica de los diferentes elementos y, en especial, sus energías superficiales.
- Deben existir fuerzas de unión suficientes para transmitir los esfuerzos de la matriz al refuerzo.
- Las uniones deben ser estables en el tiempo y sobre todo en el intervalo de temperaturas de utilización del compuesto.
- Las zonas de reacción entre la matriz y el refuerzo deben ser reducidas y no afectar a los elementos de refuerzo.

- Los coeficientes de dilatación térmica de la matriz y de los refuerzos deben ser similares para limitar los efectos de tensiones internas a través de la interfase, sobre todo al utilizar el compuesto a altas temperaturas.

Por otra parte, las propiedades mecánicas de compresión del material compuesto caracterizado resultaron mayores a los reportados para las espumas duras, materiales poliméricos en general y algunos naturales incluyendo la madera, siendo comparables con los reportados para algunas aleaciones metálicas. Este hecho, sustenta la posibilidad de desarrollar nuevos materiales potenciales a partir del procesamiento de la fracción de materiales reciclables secos, presentes en los desechos sólidos domésticos, permitiendo además reducir el impacto ambiental vinculado con el proceso general de manufactura.

Con base a la información disponible, se puede inferir que la estabilidad estructural observada, se atribuye a la buena cohesión entre las fases, así como en las interfaces, lograda gracias al comportamiento viscoelástico y reológico de la mezcla de polímeros que conforman la matriz, que a su vez está influenciado por su estructura química y física. Entre los factores a considerar en la estructura química, destacan el tipo de átomos en la cadena principal y sustituyentes y su configuración, tipo de uniones entre monómeros, peso molecular y su distribución, presencia de copolímeros, presencia de ramificaciones y entrecruzamientos en la cadenas poliméricas, entre otras. En cuanto a la estructura física influye el grado de cristalinidad, así como la temperatura de transición vítrea.

Los resultados hasta ahora obtenidos señalan que el compacto bajo estudio se puede considerar como un cuerpo continuo (no hay evidencia de espacios vacíos) e isotrópico (sus propiedades a la compresión, no parecen variar en una dirección preferencial).

Considerando el tamaño de las partículas que conforman el material obtenido, se califica como un compuesto verdaderamente particulado, en consecuencia

su análisis podría realizarse utilizando métodos complejos desarrollados en la mecánica continua y la estimación de sus propiedades mecánicas con base en la regla de las mezclas.[13-15] Sin embargo, el estudio fractográfico permitió evidenciar como el efecto del tamaño de partículas en el compuesto caracterizado, es capaz de modificar los micromecanismos de deformación plástica de la matriz, aumentando su resistencia mecánica bajo cargas de compresión. En el caso del compuesto con particulado grueso, resalta una clara evidencia de una mejor adhesión interfacial entre partículas y matriz, y por tanto de una transmisión más eficaz de las tensiones de compresión, con un comportamiento a la fluencia, que a pesar de generar fragmentación de las partículas, al igual que en el particulado fino, impide el agrietamiento del material por efecto de la concentración de tensiones en la matriz, ofreciendo un frente que retiene el inicio y la propagación de las grietas, lo cual se manifiesta con el fenómeno de abarrilamiento observado para este caso. Este hecho indica que la transferencia efectiva de carga a través de las partículas gruesas, sin duda da lugar a un aumento en los valores de las propiedades mecánicas a compresión del material caracterizado.

CONCLUSIONES

El análisis fractográfico por MEB del material compuesto de particulado fino y grueso, ensayados a compresión, reveló la fragmentación y fluencia de los distintos constituyentes del material por efecto de la fuerza de compresión aplicada, así como las características de las superficies asociadas a los modos de fallas presentados: agrietamiento y abarrilamiento, respectivamente.

El material compuesto de particulado fino ensayado a compresión, evidenció agrietamiento en planos a 45° de la superficie del material, mientras que el material compuesto de particulado grueso, presentó un severo abarrilamiento, sin embargo en ambos casos, se conservó la integridad del compacto.

Las mejores propiedades de compresión que presentó el material compuesto de particulado grueso, se atribuye, entre otros factores, a las mejores condiciones de flujo del polímero fundido que lo conforma, en comparación con el compacto de particulado fino, alcanzando una mejor cohesión entre la matriz polimérica y las partículas (vidrio, metal, cerámico, cartón), lograda gracias al comportamiento viscoelástico y reológico de la mezcla de la matriz polimérica, y permitiendo una transmisión más efectiva de las tensiones de compresión.

Las propiedades mecánicas de compresión del material caracterizado sustenta la posibilidad de desarrollar nuevos materiales potenciales, a partir de desechos y residuos sólidos domésticos, permitiendo además reducir el impacto ambiental vinculado con el proceso general de manufactura.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (CDCH) de la Universidad Central de Venezuela por el financiamiento de este trabajo a través del Proyecto PI 08-7410-2008/2-“Caracterización por Microscopia Electrónica de desechos sólidos domésticos (2da Etapa), al Fondo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (FONACIT) a través del Proyecto “Preparación y evaluación de un nuevo material a partir de residuos sólidos de origen doméstico Proyecto PEII Código N°: 2011001351”, al Laboratorio de Polímeros – USB y al Centro de Microscopia Electrónica FI-UCV, por facilitar el uso de sus Laboratorios.

REFERENCIAS

- [1] Traschinetz A. M. y Michelcic J. (2008), “Sustainable recycling of municipal solid waste in developing countries”, *Waste Management* 29:915-923.
- [2] Zhiqiang, L., Zhihua L., Xiaolin L. (2006) “status and prospect of the application of municipal solid waste

- incineration in China”, *Applied Thermal Engineering* 26:1193-1197.
- [3] Sánchez, R (2010) “Evaluación regional del manejo de residuos sólidos urbanos en América Latina y el Caribe”, Informe analítico por país: República Bolivariana de Venezuela, DIRSA-AIDIS,BID,OPS-OMS,49.
- [4] Muñoz, C.E., Arenas, F. J., Gallegos, E. (2009) “Comparative analysis of The street generation of inorganic urban solid waste (IUSW) in two neighborhoods of Mexico City” *Waste Management* 29:1167 – 1175.
- [5] Koo, H. (2009) “Life cycle impact assessment of various waste conversion technologies”, *Waste Management* 29:1892 – 1900.
- [6] Zhiqiang, L., Zhihua, L. Xiaolin,L (2006): “Status and prospect of the application of municipal solid waste incineration in China”, *Applied Thermal Engineering* 26, 1193 – 1197.
- [7] Kumar, S., Bhattacharyya, J., Vaidya, A., Chakrabarti, T., Devotta, S, Akolkar, A. (2009) “Assesment of the status of municipal solid waste management in metrocities, state capitals, class I cities, and class II towns in India: An insight”. *Waste Management* 29:883 – 895.
- [8] Abou Khatwa, M., Salem, H. G y Haggar, S. M. (2005) “Building Material from Waste”. *Canadian Metallurgical Quaterly*. Vol. 44, N° 3, pp. 339-350.
- [9] Ollila, H.J., Moilanen, A., Tiainen M. S., y Laitinen, R. S. (2006). “SEM-EDS characterization of inorganic material in refuse-derived fuels”. *Fuel* 85:2586-2592.
- [10] Trejo, R. y Morales, M. (1989). “Obtención y Caracterización de combustible solidos (RDF) a partir de los Residuos Sólidos Urbanos de una Ciudad Mexicana”. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 5: 19-40.
- [11] Bourban, P.; Bernet, J., Månson, J. (2001): “Material phenomena controlling rapid processing of thermoplastic composites”. *Composites Part A:* (32)1045 – 1057.
- [12] Chalayé, H. (2002), “Los materiales compuestos. Dinamismo e innovación. Le 4 Pages, des statistiques industrielles N° 158 –febrero 2002”. Documento en línea.http://www.insee.fr/sessi/4pages/pdf/4p158es_pagnol.pdf. Consulta: agosto 2010.
- [13] Mahieux, C.A (2001) “Cost effective manufacturing process of thermoplastic matrix composites for traditional industry: the example of a carbon – fiber reinforced thermoplastic flywheel”. *Composite Structures* 52:517 – 521.
- [14] Canal, L. P., Segurado, J., LLorca, J. (2008) “Modelización numérica de la rotura en materiales compuestos por daño en la matriz y decohesión de las fibras” *Anales de Mecánica de la Fractura* 25, Vol. 1
- [15] Ossa, E. A. “Modelación micromecánica de polímeros reforzados con partículas” (2010), *Revista Facultad de Ingeniería* , Universidad de Antioquia, No. 54, Medellín, Colombia.
- [16] Car, E., Oller, S., Oñate, E. (2000) “Tratamiento numérico de los materiales compuestos”, *Monografía CIMNE*, No. 57, Julio.
- [17] Sánchez, R., Betancourt, E., Camero, S., Molina, A. “Preparación de materiales compuestos a partir de reciclables secos presentes en los desechos sólidos domésticos”. XXXII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, AIDIS. 7 al 11/ 11/2010. República Dominicana.
- [18] Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics (2002), Vol. 8, Norma ASTM D 695-02.
- [19] Velasco J.I.; De Saja, J. A., Martínez, A. (1996). “Efecto de la interfase en la fractura de compuestos polipropileno-talco”. *Revista de plásticos modernos*, 71 (479): 467-475.

- [20] Shackelford, J. (2005) “*Introducción a la Ciencia de los Materiales para Ingenieros*”, 6ta Edición. Pearson, España, 847.
- [21] Ashby, M. (2005) “*Engineering Materials I. An Introduction to properties, Application and Design*”. Elsevier Butterword- Heinenmann.
- [22] F. Velasco, F., (1994) Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 1994.
- [23] Da Costa, C., Velasco, F., Torralba, J. (2000), “*Materiales compuestos de matriz metálica, I parte, tipos, propiedades y aplicaciones*”. *Rev. Met.*, Madrid 36:179-192.