

**CONAMA 2024**

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

# Valorización de residuos cerámicos en el sector de la construcción: un caso de simbiosis industrial



# CONAMA 2024

TÍTULO

---

**Autor Principal:** José Planelles Aragón (Instituto de Tecnología Cerámica - ITC)

**Otros autores:** Vicente Lázaro Magdalena (Instituto de Tecnología Cerámica - ITC); Marta Pérez Argilés (Instituto Tecnológico del Plástico - AIMPLAS); Victoria Pérez Quiles (SAXUN – Giménez Ganga); Javier Poveda Rodríguez (SAXUN – Giménez Ganga).

## ÍNDICE MÍNIMO

0. Resumen
1. Introducción
2. Caracterización del residuo
  - 2.1. Contexto
  - 2.2. Caracterización físico-química
3. Valorización del residuo
  - 3.1. Estrategia de valorización
  - 3.2. Requisitos y tratamiento previo
  - 3.3. Fabricación y caracterización de composites de PVC
4. Conclusiones
5. Bibliografía

## RESUMEN

Este estudio explora la viabilidad de utilizar residuos de tiesto cerámico cocido como alternativa al carbonato cálcico en compuestos de PVC para construcción. A través de un tratamiento adecuado, el tiesto se integró en la matriz de PVC con estabilidad de procesamiento y propiedades técnicas adecuadas, pese a una ligera disminución en algunos aspectos mecánicos. Con todo esto, si bien el tiesto cerámico puede mejorar ciertas propiedades del material, es fundamental optimizar su concentración para mantener un equilibrio entre las propiedades mecánicas y el rendimiento del compuesto.

## 1. INTRODUCCIÓN

Durante las próximas décadas, las transformaciones económicas y sociales serán de gran calado. Las empresas y organizaciones están llamadas a desempeñar un rol crucial en estos cambios, ya que su actuación, tanto desde sus modelos de negocio como desde sus cadenas de valor, será esencial para promover la **economía circular** y contribuir a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Mientras que los ODS marcan el rumbo para avanzar hacia un desarrollo sostenible, la economía circular se erige como una estrategia operativa indispensable para lograr un crecimiento que respete los límites del planeta.

La transición hacia un modelo circular, sin embargo, no es sencilla. La fuerte adhesión de la sociedad al sistema lineal de producción y consumo supone una barrera cultural significativa. Es un modelo que, aunque ha predominado durante años, ha demostrado ser insostenible. Por ello, cualquier cambio en esta dirección necesita una transformación profunda, no solo a nivel técnico y económico, sino también cultural. Aquí es donde la **simbiosis industrial (SI)** entra en escena como una solución innovadora. La SI busca maximizar el uso eficiente de los recursos y minimizar la producción de residuos, emisiones y pérdidas energéticas. Para lograrlo, propone estrategias que extienden el ciclo de vida de los materiales y de la energía, favoreciendo procesos como la reutilización, el reacondicionamiento, el reciclaje y la reparación.

Desde la perspectiva empresarial, la SI ofrece un conjunto de beneficios claros. No solo ayuda a reducir costes y diversificar oportunidades de crecimiento, sino que también permite mejorar la imagen corporativa frente a los clientes y otras partes interesadas. Además, la SI es una herramienta valiosa para mitigar retos globales como el cambio climático y la escasez de recursos naturales, promoviendo un uso más eficiente y responsable de estos. En esencia, la SI implica que una empresa aproveche los recursos disponibles en otras industrias o sectores, extendiendo su utilidad y reduciendo su impacto medioambiental. Estos "recursos" incluyen subproductos, residuos, energía, agua, conocimientos, infraestructuras y equipos, entre otros.

El concepto de SI se sustenta sobre dos pilares fundamentales: la ecología industrial y la sostenibilidad. La ecología industrial observa el funcionamiento de los sistemas industriales como análogos a los ecosistemas naturales, promoviendo la diversidad, la resiliencia y la regeneración. Este enfoque busca generar una ventaja competitiva mediante el intercambio y

la reutilización de recursos entre diferentes actores. Por su parte, la sostenibilidad impulsa un desarrollo industrial más equilibrado desde el punto de vista ambiental, sin descuidar los beneficios económicos.

En la **industria cerámica**, por ejemplo, el uso de materias primas secundarias provenientes de flujos de residuos permite reducir la dependencia de materias vírgenes, tanto en términos de disponibilidad como de coste. Sin embargo, integrar materiales residuales de otros sectores plantea desafíos técnicos, ambientales y económicos. Desde una perspectiva técnica, a menudo es necesario realizar ajustes que faciliten la integración de estos recursos, como el pretratamiento para eliminar contaminantes o la modificación de los procesos de producción para adaptarse a la composición de las materias secundarias. Igualmente importante es analizar cómo afectan estas nuevas materias primas a las propiedades del producto final, además de estudiar el impacto medioambiental y la viabilidad económica de su uso, a través de la relación coste/beneficio.

El proyecto **RECERCO** (INNEST/2022/133), financiado a través del Instituto Valenciano de Competitividad e Innovación (Ivace+i), tiene como objetivo principal la valorización del **tiesto cocido cerámico**, es decir, los fragmentos de baldosas cerámicas de arcilla roja que son descartados durante el proceso de producción por no cumplir con los estándares de calidad. Estos residuos, tras ser sometidos a un proceso de molturación, se transforman en un polvo fino que puede ser utilizado como agente de refuerzo en matrices poliméricas, concretamente en **compuestos de PVC**, destinados a diversas aplicaciones en el sector de la construcción (**Figura 1**).



**Figura 1.** Esquema de valorización del tiesto cerámico en la industria del plástico.

Este enfoque permite reducir la cantidad de residuos cerámicos que actualmente se envían a vertederos, disminuyendo así los impactos ambientales asociados a su gestión. Al mismo tiempo, contribuye a reducir la dependencia de materias primas vírgenes como el **carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ )**, que tradicionalmente se utiliza como refuerzo en estos compuestos. El tiesto cerámico molido no solo ofrece una alternativa más sostenible, sino que también puede mejorar las propiedades de los materiales compuestos, contribuyendo a la creación de productos con mayor valor añadido en el sector de la construcción.

Con RECERCO, se fomenta la SI a través de una sinergia entre el sector cerámico y el de plásticos, estableciendo una relación intersectorial en la que los residuos de la industria cerámica se convierten en recursos valiosos para la producción de materiales compuestos basados en PVC. De este modo, se promueve un uso más eficiente de los recursos y se avanza hacia un modelo de economía circular en la Comunidad Valenciana.

En el presente documento, se recogen los resultados del estudio de valorización del tiesto cerámico cocido de pasta roja, como agente de refuerzo de matrices de PVC, para su aplicación en el sector de la construcción.

## 2. CARACTERIZACIÓN DEL RESIDUO

### 2.1. Contexto

La producción de baldosas cerámicas en la Unión Europea (UE) genera un volumen considerable de residuos. Aunque los datos específicos varían según las fuentes y las condiciones de producción, estimaciones basadas en informes sectoriales y análisis internos sugieren que el volumen anual podría situarse en torno a varios cientos de miles de toneladas. Aunque una gran parte de estos residuos se reintroduce en el proceso de fabricación, todavía existe un porcentaje que no se recicla y termina en vertederos. Esto se debe, en muchos casos, a que su reutilización puede alterar las propiedades finales de las baldosas cerámicas, lo que hace necesario un esfuerzo adicional de I+D para adaptarlos como materias primas secundarias de forma eficiente.

En su afán por reducir el uso de materias primas vírgenes y el impacto ambiental, la industria cerámica ha logrado reutilizar prácticamente el 100% de los residuos de arcilla cruda antes de la etapa de cocción. También se han desarrollado métodos para recuperar el tiesto cocido, aunque principalmente se han centrado en residuos de cocción blanca, derivados del uso de **arcillas blancas**. Este enfoque responde a la evolución del sector, que ha pasado de utilizar mayoritariamente **arcillas rojas** locales a depender cada vez más de materias primas de mayor valor, como la arcilla blanca, importada en su mayoría. Mientras que en las últimas décadas del siglo XX la producción de baldosas de cocción blanca representaba apenas el 15% de la producción total, en 2023 este porcentaje alcanzó el 82% (ASCER, 2024).

La situación es diferente en el caso de los tiestos de cocción roja, que son los que aborda el proyecto RECERCO. Estos residuos provienen de arcillas locales abundantes y, hasta hace poco, de bajo coste, por lo que un gran volumen de ellos termina en vertederos o se utiliza en

productos de bajo valor añadido, como áridos para hormigón o materiales de relleno en la estabilización de suelos. Sin embargo, la reciente crisis de suministro de arcilla blanca, provocada en gran parte por el conflicto bélico en Ucrania, que suministra aproximadamente el 75% de esta materia prima, y la también reciente normativa sobre residuos y economía circular (Ley 7/2022 del 8 de abril), han puesto de manifiesto la urgente necesidad de valorizar el tiesto cocido rojo. Esto implica reconsiderar su clasificación como residuo y comenzar a verlo como una **materia prima secundaria** valiosa, no solo para la industria cerámica, sino también para otros sectores, como el del plástico, a través de sinergias en el marco de la SI.

En España, la producción anual de baldosas cerámicas alcanza los 394 millones de metros cuadrados en 2023 (ASCER, 2024), y se estima que el volumen de tiesto cocido generado representa alrededor del 3% de la producción total en metros cuadrados. Si consideramos que las baldosas de pasta roja suponen aproximadamente el 18% de la producción total, podemos hacer una estimación del volumen de tiesto de cocción roja que se genera anualmente. Este cálculo se basa en la proporción de productos de pasta roja, con un 30% de gres rojo y un 70% de porosa roja, y en las densidades superficiales correspondientes: 19,7 kg/m<sup>2</sup> para el gres rojo y 16,4 kg/m<sup>2</sup> para la porosa roja. A partir de estos datos, se obtiene una densidad superficial ponderada de 17,5 kg/m<sup>2</sup> para los productos de pasta roja, lo que nos lleva a una cifra aproximada de **37.275 toneladas** de tiesto rojo generadas cada año en el sector cerámico español.

En lo que respecta a los gastos asociados a la gestión del residuo, en la Comunidad Valenciana, una de las regiones más importantes para la industria cerámica en España, los costes asociados al vertido de residuos cerámicos, como el tiesto cocido, son estimaciones realizadas por los autores a partir de encuestas realizadas a empresas de gestión de residuos. Estas estimaciones indican que los costes oscilan entre 10 y 20 €/tonelada, dependiendo del vertedero específico donde se gestionen los residuos, que se consideran inertes. Aunque la Comunidad Valenciana no cuenta actualmente con un canon de vertido específico para residuos inertes, se anticipa que futuras regulaciones impulsadas por la legislación nacional y europea podrían fomentar el reciclaje y desincentivar el vertido. En cuanto al transporte, se estima que los costes pueden variar entre 5 y 10 €/tonelada para distancias moderadas (hasta unos 50 km), y debido a la cercanía de vertederos especializados, estos costes se mantienen relativamente bajos. Finalmente, los costes asociados a la manipulación interna del residuo (carga, almacenamiento temporal, preparación para el transporte) se estiman entre 2 y 5 €/tonelada, en función de la eficiencia logística de cada empresa. Por lo tanto, el coste total de gestión de residuos cerámicos en la Comunidad Valenciana podría situarse entre **17 y 35 €/tonelada**, dependiendo de factores como el transporte y las tarifas del vertedero específico.

## 2.2. Caracterización físico-química

En el marco del proyecto RECERCO, se llevó a cabo un análisis detallado de la **composición química** del tiesto cocido de pasta roja, un residuo cerámico que proviene de los fragmentos de baldosas no conformes generados durante la fabricación de pavimentos y revestimientos cerámicos. El estudio se centró en la provincia de Castellón, área que concentra el 94% de la producción de baldosas cerámicas en España, lo que lo convierte en un punto clave para el análisis de residuos cerámicos. En esta zona, diversas empresas gestoras de residuos recogen y

trituran los fragmentos de baldosas para su clasificación granulométrica y posterior comercialización como áridos.

Las muestras de tiesto cocido de pasta roja fueron recolectadas de varias de estas empresas gestoras de residuos, con el fin de analizar la composición química promedio y representativa de este material. Los fragmentos fueron fraccionados en distintas granulometrías mediante tamices, y se realizaron análisis químicos a través de Fluorescencia de Rayos X (FRX) <sup>1</sup> para determinar la concentración de diversos óxidos en las distintas fracciones. Los resultados de los análisis se presentan en el **Cuadro 1**, donde se muestra la composición química promedio de dos fracciones granulométricas:  $\phi > 4\ \mu\text{m}$  y  $\phi < 125\ \mu\text{m}$ , siendo  $\phi$  el diámetro de partícula. Los datos reflejan que las variaciones en la composición química entre las diferentes fracciones de tamaño son mínimas, lo que destaca la **homogeneidad** química del material a pesar de la diferencia en granulometría. Estos resultados sugieren que el tiesto cocido de pasta roja, gestionado por estas empresas, puede ser tratado de manera uniforme para su reutilización en aplicaciones industriales.

**Cuadro 1.** Composición química promedio de las muestras de tiesto rojo fraccionadas.

| Óxidos (%)                     | $\phi > 4\mu\text{m}$ | $\phi < 125\mu\text{m}$ |
|--------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 66,8                  | 66,5                    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 17,5                  | 16,0                    |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,11                  | 2,95                    |
| CaO                            | 4,39                  | 5,11                    |
| MgO                            | 1,43                  | 1,62                    |
| Na <sub>2</sub> O              | 1,86                  | 1,84                    |
| K <sub>2</sub> O               | 2,65                  | 2,39                    |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,65                  | 0,63                    |
| ZrO <sub>2</sub>               | 0,18                  | 0,30                    |
| BaO                            | 0,07                  | 0,13                    |
| PbO                            | <0,01                 | 0,11                    |
| ZnO                            | 0,13                  | 0,29                    |
| HfO <sub>2</sub>               | <0,01                 | <0,01                   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,14                  | 0,14                    |
| SrO                            | 0,01                  | 0,02                    |
| MnO                            | 0,03                  | 0,03                    |

<sup>1</sup> La determinación de la pérdida por calcinación se llevó a cabo por gravimetría con un analizador termogravimétrico (LECO). Los elementos analizados se determinaron mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X por dispersión de longitudes de onda (PANalytical).

|                                      |       |       |
|--------------------------------------|-------|-------|
| CuO                                  | <0,01 | <0,01 |
| Pérdida por calcinación (ppc 1000°C) | 0,45  | 1,59  |

### 3. VALORIZACIÓN DEL RESIDUO

#### 3.1. Estrategia de valorización

La incorporación de cargas inorgánicas es un método reconocido para mejorar las propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas de los plásticos. La formulación de matrices poliméricas con estas cargas permite desarrollar nuevos materiales con características superiores. Además, la adición de cargas puede reducir los costes de producción, ya que estos materiales suelen ser más económicos que los polímeros. Así, desde su aparición en el siglo XIX, la incorporación de cargas en matrices poliméricas ha pasado de ser una estrategia puramente económica a una técnica fundamental para mejorar el rendimiento técnico de los plásticos. En este sentido, con una composición adecuada de polímeros y cargas inorgánicas, se pueden lograr propiedades intermedias. Por ejemplo, una formulación optimizada puede aumentar la resistencia a la tracción y el impacto, ampliando así las aplicaciones de los plásticos. Además, mediante la incorporación de cargas minerales, también es posible modificar propiedades como el coeficiente de fricción y la resistencia a la intemperie (Pegoretti & Dorigato, 2019).

La selección del agente de refuerzo se basa en múltiples consideraciones técnicas y económicas. Es fundamental que el material elegido cumpla con una serie de requisitos para asegurar una adecuada compatibilidad con la matriz polimérica. Estos requisitos incluyen:

- **Compatibilidad química:** El agente de refuerzo debe ser no tóxico, además de mostrar inercia química y estabilidad ante el calor y la luz.
- **Granulometría adecuada:** El tamaño de las partículas debe ser el adecuado para facilitar una buena dispersión dentro de la matriz.
- **Baja abrasividad:** La dureza de Mohs de las cargas debe considerarse cuidadosamente para evitar el desgaste de los equipos durante el proceso de mezcla.

La composición química de los agentes de refuerzo es crucial, ya que la presencia de impurezas, incluso en pequeñas cantidades, puede afectar negativamente propiedades como la estabilidad química, el color y la conductividad eléctrica. Asimismo, la química superficial de los refuerzos influye en la interacción entre el refuerzo y la matriz polimérica. Por ejemplo, la aplicación de un agente de acoplamiento puede mejorar significativamente esta interacción, especialmente en sistemas donde se busca maximizar la adhesión entre las fases.

Además, el tamaño y la forma de las partículas son determinantes para las propiedades físicas y la procesabilidad de los composites. Se utilizan métricas como el diámetro esférico equivalente (ESD), que es el diámetro de una esfera que tenga el mismo volumen que la partícula, y el tamaño promedio de partícula (d50), que indica el tamaño en el que el 50% de las partículas son más pequeñas y el 50% son más grandes.

Por último, la gestión de la humedad de las cargas minerales es un aspecto crítico. Aunque algunos materiales son no higroscópicos, pueden adsorber agua en la superficie, lo que podría causar problemas en el procesado, especialmente en matrices como el PVC. Un manejo inadecuado durante la manipulación puede resultar en la introducción de humedad no deseada, afectando las características finales del producto.

En el marco del proyecto RECERCO, el tiesto cocido cerámico se emplea como refuerzo en matrices termoplásticas, específicamente en PVC. Este enfoque busca reemplazar las cargas minerales convencionales, como el  $\text{CaCO}_3$ , para mejorar las propiedades mecánicas y funcionales del material final. De esta manera, no solo se contribuye a la reducción de residuos industriales, sino que también se ayuda a minimizar la explotación de recursos naturales, como es el caso del  $\text{CaCO}_3$ , que se extrae mediante procesos de minería.

### 3.2. Requisitos y tratamiento previo

El proceso de valorización del tiesto cocido como materia prima secundaria en la industria del plástico está condicionado por la **granulometría** del material, un factor crítico para su integración en matrices termoplásticas de PVC. Este residuo no puede emplearse directamente en los procesos de fabricación; es necesaria una etapa de tratamiento que consiste en reducir el tamaño de partícula del tiesto hasta alcanzar los valores requeridos.

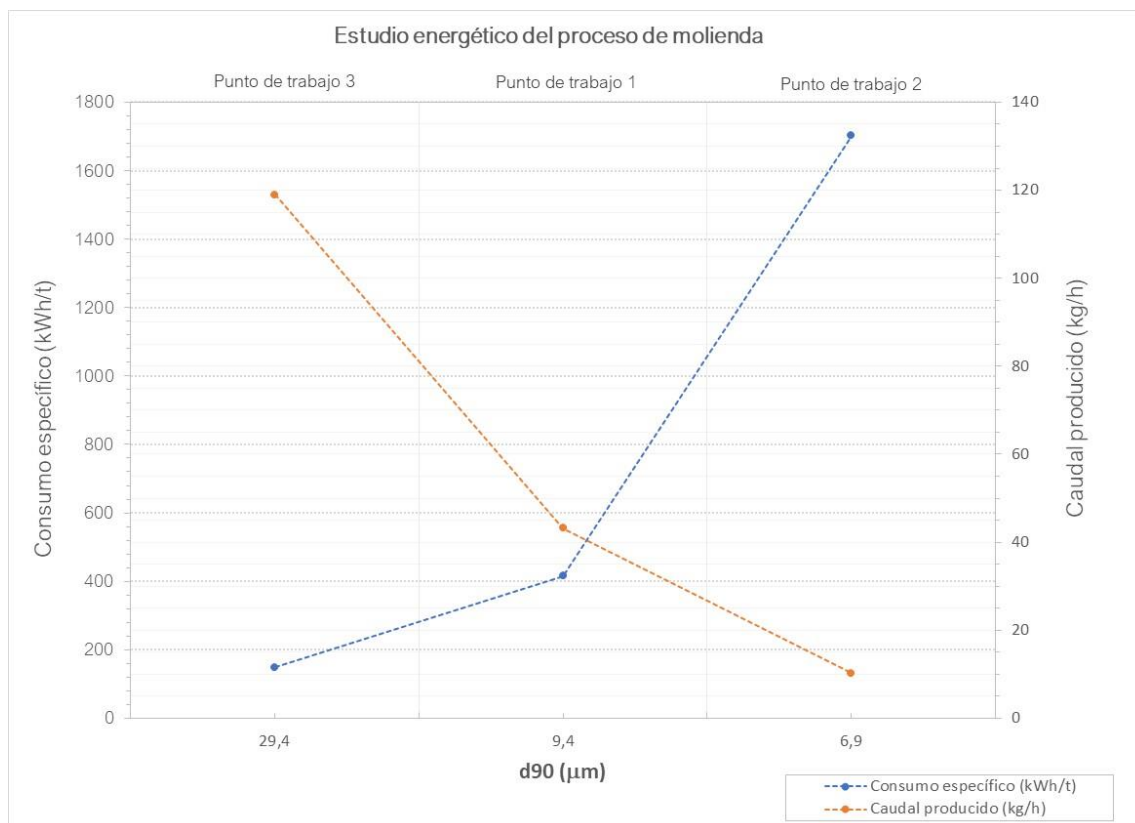
Para la aplicación en composites termoplásticos de PVC, reemplazando completamente al  $\text{CaCO}_3$ , teóricamente el tiesto cocido debería presentar una granulometría de **d90** entre 1.35 y 2  $\mu\text{m}$  y una dureza 3 en la **escala de Mohs**, siendo estos los valores correspondientes al carbonato cálcico precipitado (PCC) empleado habitualmente en el refuerzo de plásticos. Además, es importante evaluar las **coordenadas cromáticas L\*ab** para determinar si es necesario mezclar con pigmentos, así como el contenido de **humedad**, que puede requerir un secado previo antes del procesado.

La elección de la tecnología de molienda depende del rango de tamaños que cada método puede procesar. Un análisis bibliográfico inicial identificó que la molturación ultrafina en molino jet y en molino de bolas son las opciones adecuadas para alcanzar la granulometría necesaria en el sector plástico. Ambas tecnologías son efectivas para materiales duros como el tiesto cocido. El molino jet de lecho fluidizado se destaca por producir tamaños de partícula inferiores a 10  $\mu\text{m}$  y con distribuciones estrechas, minimizando la contaminación por desgaste (Sun et al., 2013). Sin embargo, su elevado consumo energético lo hace rentable principalmente en productos de alto valor, como en farmacéutica o cosmética (Chamayou & Dodds, 2007).

Con una granulometría de partida de 0 a 5 mm, el tiesto cocido requiere una pre-molturación en molino pendular o de discos para reducir el tamaño antes de entrar al molino jet, implicando un coste energético adicional. Además, al tratarse de un residuo, puede ocurrir segregación de fracciones distintas durante la molturación. Por lo tanto, la tecnología más adecuada para el tratamiento del tiesto cocido y su integración en composites de matrices termoplásticas de PVC es la molturación en **molino de bolas por vía seca**.

La reducción de la granulometría del material impacta directamente en el **consumo energético** del molino, lo cual afecta la viabilidad económica del proceso. Es decir, cuanto más fino debe

ser el material, mayor es el consumo energético requerido, y esto aumenta considerablemente los costes operativos del proceso de valorización. Así, en el diseño del proceso de molienda, se definieron tres granulometrías de referencia, denominados puntos de trabajo 1, 2 y 3, tal y como se observa en la **Figura 2**. De este análisis se desprende que, el consumo energético específico (kWh/t) crece a medida que disminuye el tamaño de partícula final, puesto que se requieren tiempos más largos de molienda, cayendo la **producción** (kg/h) <sup>2</sup>.



**Figura 2.** Análisis comparativo del consumo específico, caudal producido y granulometría alcanzada en los 3 puntos de trabajo del estudio.

Los resultados obtenidos muestran que, en términos de granulometría, cumplir con los requisitos exigidos para su uso en composites de matrices termoplásticas de PVC ( **$d_{90}$  entre 1.35 y 2  $\mu\text{m}$** ) representa un desafío considerable. Reducir el material a estos tamaños de partícula incrementaría el consumo energético a niveles que comprometen gravemente la **viabilidad económica del proceso**. Además, el tiesto cocido presenta una dureza en la escala de Mohs de 6, superior a la del PCC que se utiliza habitualmente en estos composites, lo que aumenta el desgaste de los equipos de procesado.

Para mitigar estas limitaciones técnicas, se implementaron ajustes específicos en el procesado de los composites, permitiendo la incorporación del tiesto cocido, que presenta una granulometría y dureza superiores a las del PCC habitualmente empleado. A este respecto, se

<sup>2</sup> El estudio se llevó a cabo en las instalaciones de la empresa de maquinaria industrial Chumillas Technology, empleando un molino de bolas continuo MBC2 con un tambor con una capacidad de 2000 litros.

alcanzó un compromiso en cuanto a la granulometría, con un tamaño de partícula **d90 de 6,94  $\mu\text{m}$** , superior al del PCC utilizado en la industria, lo que se decidió para evitar un consumo energético excesivo que comprometiera la viabilidad económica del proceso. También se incluyó la opción de realizar un secado previo de la carga, dado que el nivel de humedad del tiesto cocido podría afectar su integración en la matriz de PVC. Asimismo, el color natural del residuo podría restringir su aplicabilidad en ciertos productos; sin embargo, esto puede compensarse mediante el uso de pigmentos que ajusten el tono final del material. Con todo esto, el éxito en la valorización del tiesto cocido dependerá, por lo tanto, de una cuidadosa consideración de estos factores técnicos, asegurando su adecuación como materia prima secundaria en la producción de composites de PVC. Los resultados finales del tratamiento del residuo para su posterior incorporación en el procesado de PVC se presentan en el **cuadro 2**.

**Cuadro 2.** Propiedades finales del tiesto cocido tratado.

|                                                  |                    |
|--------------------------------------------------|--------------------|
| Granulometría d90 ( $\mu\text{m}$ ) <sup>3</sup> | 6,94               |
| Producción (kg/h)                                | 10,2               |
| Consumo específico (kWh/t)                       | 1702,1             |
| Dureza de Mohs <sup>4</sup>                      | 6                  |
| Humedad (%) <sup>5</sup>                         | 0,45               |
| Color (L*a*b) <sup>6</sup>                       | (65,1, 14,4, 21,0) |

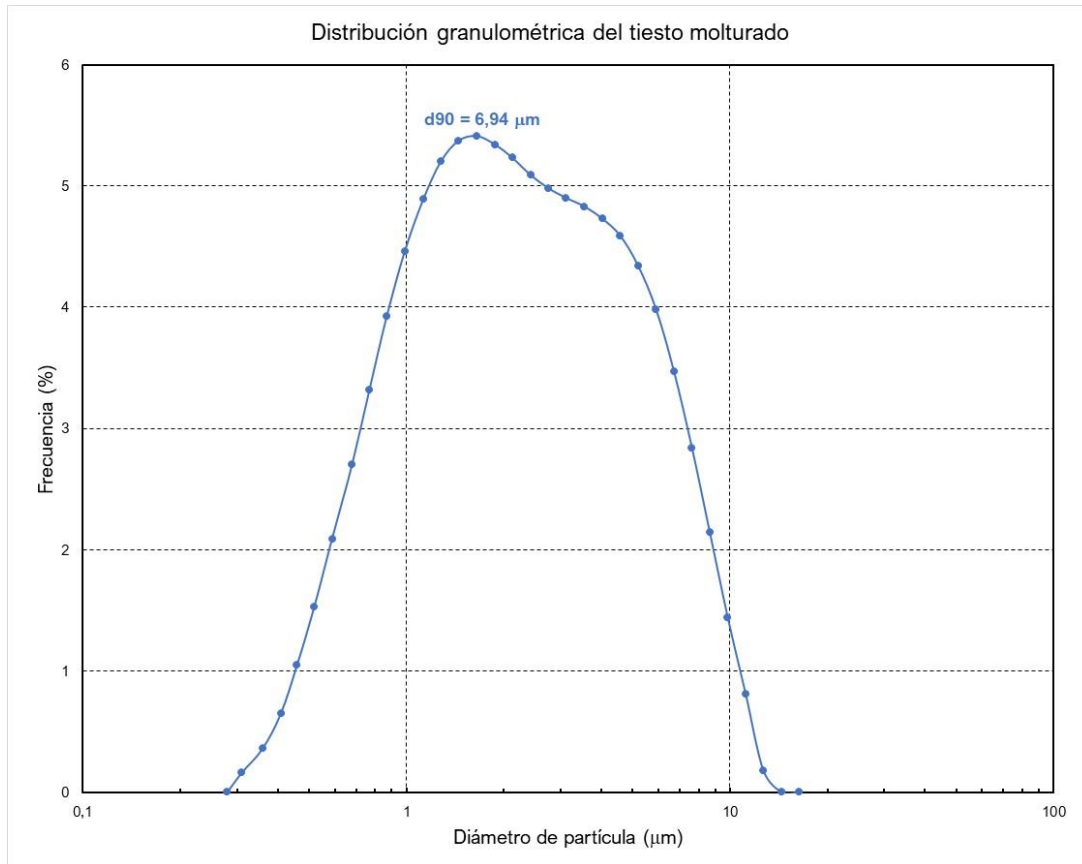
Igualmente, se presenta una **curva de distribución** de tamaños del material, obtenida tras la molturación (**Figura 3**).

<sup>3</sup> La distribución de tamaños de partícula se determinó empleando un equipo de difracción láser MASTERSIZER 3000 (Malvern).

<sup>4</sup> Ensayo realizado según norma UNE 67-101:1985+1M:92.

<sup>5</sup> Se determinó la humedad mediante una balanza de infrarrojos (Mettler Toledo).

<sup>6</sup> Se obtuvieron las coordenadas cromáticas mediante un espectrofotómetro de reflectancia difusa (Macbeth).



**Figura 3.** Distribución granulométrica del tiesto cocido molturado hasta la granulometría requerida para su incorporación en compuestos de PVC.

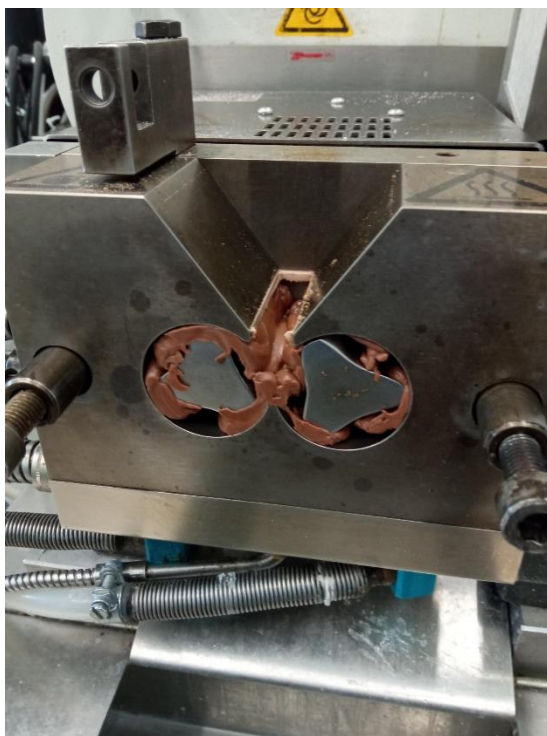
### 3.3. Fabricación y caracterización de composites de PVC

El presente apartado se centra en los resultados del estudio de viabilidad técnica realizado sobre la incorporación de tiesto cocido en compuestos de PVC, donde se reemplazó completamente al  $\text{CaCO}_3$ , comúnmente utilizado en la industria del plástico. Este enfoque innovador no solo busca valorar el uso de residuos cerámicos, sino también evaluar sus efectos en las propiedades físicas de los compuestos de PVC. Así, se realizaron diversas pruebas de **formulación**, **procesado** y **caracterización** para garantizar que el residuo cerámico cumpliera con los requisitos de la industria del plástico en cuanto a resistencia, durabilidad y procesabilidad de los compuestos de PVC resultantes.

Se desarrollaron formulaciones de PVC variando la proporción de tiesto cerámico (entre 10 y 40 phr <sup>7</sup>) en lugar del PCC estándar. El proceso incluyó la preparación del “dry-blend”, que consistió en la mezcla de PVC, estabilizantes térmicos, modificadores de impacto, lubricantes y el tiesto cocido en diversas proporciones. Las formulaciones resultantes fueron procesadas en un

<sup>7</sup> phr (*parts per hundred resin*) es una unidad de medida empleada en la formulación de compuestos, que indica la cantidad (partes) de aditivo por cada 100 partes de resina (PVC).

turbomezclador y el ajuste de parámetros de procesado, como la velocidad y temperatura, para asegurar una mezcla homogénea y una adecuada **gelificación** (Figura 4). En pruebas adicionales, se determinó que una carga superior a 40 phr del residuo cerámico generaba problemas de gelificación en el procesado, requiriendo ajustes para mejorar la integración del material.



**Figura 4.** Evaluación de composiciones de PVC que incorporan tiesto rojo como carga mineral en un mezclador Brabender Plasticorder. (Fuente: AIMPLAS)

Las formulaciones validadas se procesaron mediante **extrusión** en una extrusora de doble husillo contra-rotativa, obteniendo perfiles que sirvieron como base para la fabricación de las probetas de ensayo. La temperatura y velocidad del proceso se ajustaron para optimizar el acabado superficial y la estabilidad del perfil extruido (Figura 5). En líneas generales, los perfiles obtenidos presentaron un procesado estable y un buen acabado superficial, exhibiendo tonalidades de colores similares con independencia de la cantidad de tiesto incorporada en la fórmula.



**Figura 5.** Obtención de perfiles de PVC por extrusión, incorporando tiesto de cocción roja como carga mineral. (Fuente: SAXUN – Giménez Ganga)

Tras obtener los perfiles de PVC, se procedió a la caracterización física del material compuesto, tomando como referencia el PVC reforzado con PCC. Esta comparación permitió evaluar el impacto del reemplazo del PCC por tiesto cerámico molido en las **propiedades mecánicas** de los compuestos. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los distintos ensayos (**Cuadro 3**).

**Cuadro 3.** Propiedades mecánicas del PVC reforzado con PCC (referencia) y tiesto cerámico molido.

| Propiedad Mecánica                 | PVC + PCC (eferencia) | PVC + Tiesto RECERCO |
|------------------------------------|-----------------------|----------------------|
| Resistencia a la flexión (MPa)     | 67                    | 60                   |
| Módulo de flexión (MPa)            | 3451                  | 2966                 |
| Resistencia a la tracción (MPa)    | 39                    | 39                   |
| Límite elástico (MPa)              | 25                    | 26                   |
| Deformación en punto de rotura (%) | 36,7                  | 44,5                 |
| Dureza Shore D                     | 79,6                  | 79,4                 |
| Impacto Charpy (kJ/m²)             | 8,215                 | 5,077                |

Los resultados del ensayo de tracción, realizados conforme a la norma UNE-EN ISO 527-2, revelaron que tanto el PVC reforzado con PCC como el compuesto que incorpora tiesto cerámico molido presentaron una resistencia a la tracción similar, con un valor de 39 MPa en ambos casos. Sin embargo, se observó una ligera mejora en el límite elástico del compuesto con tiesto cerámico, alcanzando 26 MPa frente a los 25 MPa del material de referencia. Además, la deformación en el punto de rotura fue notablemente mayor en el compuesto con tiesto cerámico, alcanzando un 44,5% en comparación con el 36,7% del PVC con PCC. Esto sugiere que, aunque la resistencia a la **tracción** se mantuvo constante, el uso de tiesto cerámico molido podría mejorar la ductilidad del material. No obstante, en otras pruebas realizadas, variando la concentración de tiesto (phr), se observa que a medida que se incrementa la cantidad de residuo cerámico en la formulación, la resistencia a la tracción tiende a disminuir.

Con respecto a los resultados del ensayo de **flexión**, conforme a la norma UNE-EN ISO 178, el uso de tiesto cerámico molido en lugar de PCC provocó una disminución en la resistencia a la flexión, alcanzando 60 MPa en la formulación con tiesto cerámico, frente a los 67 MPa del PVC reforzado con PCC. Asimismo, el módulo de flexión se redujo notablemente, con un valor de 2966 MPa en comparación con 3451 MPa del material de referencia. Este efecto se manifestó, también, en experimentos adicionales, donde se concluyó que a mayor cantidad de residuo cerámico (en phr) la resistencia a la flexión disminuye. Este efecto podría limitar el uso del compuesto en aplicaciones donde la flexión es crítica.

Además, se evaluó la **dureza** Shore D de los compuestos. Los resultados mostraron que existía una ligera diferencia entre el compuesto de referencia y el que contenía tiesto, lo cual indica que la incorporación de tiesto cerámico no afecta significativamente la dureza del material.

Para finalizar el estudio de propiedades mecánicas, se evaluaron los resultados del ensayo de **impacto** Charpy conforme a la norma UNE-EN ISO 179-1. En este caso, el PVC reforzado con tiesto cerámico molido mostró una reducción en la resistencia al impacto, con valores de 5,077 kJ/m<sup>2</sup>, frente a los 8,215 kJ/m<sup>2</sup> del PVC con PCC. Esta disminución en la resistencia al impacto se evidenció de manera más clara a medida que se incrementó la cantidad de tiesto cerámico en las formulaciones. Así, la reducción en la absorción de impactos podría representar una limitación en aplicaciones que requieren alta resistencia a golpes o fuerzas de impacto. Con todo esto, si bien el tiesto cerámico puede mejorar ciertas propiedades del material, es fundamental optimizar su concentración para mantener un equilibrio entre las propiedades mecánicas y el rendimiento del compuesto.

En lo que respecta a las **propiedades térmicas** del PVC modificado con tiesto cerámico, se analizaron varios aspectos clave: la estabilidad dimensional tras exposición al calor (UNE EN 478), la conductividad y resistencia térmica (UNE-EN 12667 y UNE-EN 12664), y la temperatura de Vicat. Adicionalmente también se realizó un estudio de los materiales mediante DSC (UNE-EN ISO 11357). A continuación, se muestra cómo varían las propiedades térmicas de los compuestos de PVC con la concentración de tiesto incorporada en fórmula (phr).

**Cuadro 4.** Variación de las propiedades térmicas del PVC reforzado con la concentración de tiesto incorporada en fórmula (phr).

| Propiedad                                        | 10 phr  | 20 phr  | 30 phr  | 35 phr  | 40 phr  |
|--------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Contracción Térmica Máxima (%)                   | 0,98    | 0,83    | 0,78    | 0,79    | 0,83    |
| Conductividad Térmica (W/(m·K)) a 25°C           | 0,08914 | 0,12420 | 0,13779 | 0,14410 | 0,14914 |
| Resistencia Térmica (m <sup>2</sup> ·K/W) a 25°C | 0,1725  | 0,0998  | 0,0926  | 0,0856  | 0,0824  |

Los resultados obtenidos muestran que la contracción térmica máxima de las muestras con tiesto cerámico se mantiene en niveles bajos, con variaciones entre 0,78% y 0,98%, indicando una buena **estabilidad dimensional** tras la exposición al calor.

La **conductividad térmica** a 25°C, por su parte, se incrementa con la cantidad de residuo cerámico. Esto resulta en una disminución en la **resistencia térmica**, que también se observa en los valores obtenidos.

Por su parte, la medida de la **temperatura de Vicat**, que indica la temperatura a la cual un material comienza a perder sus propiedades físicas y mecánicas, presenta una variación mínima al compararse con el PVC reforzado con PCC (82,99 frente a 82,46°C, respectivamente), por lo que el cambio de agente de refuerzo no ocasiona deterioro en esta propiedad.

La Calorimetría Diferencial de Barrido (**DSC**) es una técnica utilizada para estudiar las transiciones térmicas de los materiales, proporcionando información valiosa sobre su comportamiento térmico y estructural. En el análisis de polímeros reforzados, la DSC permite determinar aspectos clave como la **temperatura de transición vítrea (Tg)** y el **grado de gelificación**, lo que resulta fundamental para evaluar la efectividad del refuerzo y su influencia en las propiedades mecánicas. En el presente estudio, se observó que la Tg fue similar entre ambas formulaciones, con valores de 87,43°C para la formulación reforzada con tiesto cerámico y 86,90°C para la formulación estándar de PVC con PCC. Sin embargo, se detectó una variación significativa en el grado de gelificación, siendo del 50,0 % para la fórmula reforzada con tiesto cerámico y del 93,64 % para la fórmula estándar. Esta notable diferencia en el grado de gelificación podría ser un factor determinante en la reducción de la resistencia al impacto observada en las formulaciones que incorporan tiesto cerámico.

Por su parte, el ensayo de **envejecimiento acelerado**, conforme a la norma UNE-EN 527, es crucial para evaluar la durabilidad de los materiales plásticos en condiciones de exposición a la luz solar, particularmente en aplicaciones exteriores. Este ensayo simula el efecto del tiempo y la radiación solar, permitiendo prever el comportamiento de los materiales a largo plazo. Los resultados mostraron que la resistencia al impacto de la formulación de PVC reforzado con PCC disminuyó de forma brusca en las primeras horas de exposición. En contraste, la formulación reforzada con tiesto cerámico mostró una caída de resistencia más gradual, indicando una mayor estabilidad y durabilidad en condiciones de exposición prolongada. Estos hallazgos

sugieren que el uso de tiesto cerámico en la formulación puede ser beneficioso para aplicaciones exteriores, donde la resistencia al envejecimiento es un factor crítico.

Finalmente, el ensayo de **inflamabilidad** se realizó según la norma EN ISO 5660-1, evaluando el desprendimiento de calor, la producción de humo y la tasa de pérdida de masa. Este estudio es crucial para garantizar la seguridad de los materiales en aplicaciones exteriores.

**Cuadro 5.** Resultados de inflamabilidad para los compuestos de PVC reforzados con PCC y tiesto cerámico.

| Muestra                                    | Tiempo Inicial de Ignición (s) | Tiempo Fin de Ignición (s) | MARHE (kW/m²) |
|--------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------|---------------|
| PVC reforzado con PCC                      | 26,7                           | 37,7                       | 33,36         |
| PVC reforzado con tiesto cerámico (10 phr) | 37,0                           | 48,5                       | 28,62         |
| PVC reforzado con tiesto cerámico (20 phr) | 116,0                          | 839,3                      | 60,53         |
| PVC reforzado con tiesto cerámico (30 phr) | 232,3                          | 802,3                      | 51,36         |
| PVC reforzado con tiesto cerámico (40 phr) | 413,0                          | 761,1                      | 38,81         |

Los resultados (**Cuadro 5**) revelaron que, en general, al aumentar la concentración de tiesto cerámico, se incrementa el tiempo necesario para iniciar la ignición, indicando una mejor resistencia al fuego. Además, se observó que todas las muestras presentaron valores de MARHE (Medida de la Tasa de Calor Radiado por la Ignición) iguales o inferiores a 60 kW/m², lo que sugiere un bajo desprendimiento de calor y limitada capacidad de propagación del incendio.

4. CONCLUSIONES

El estudio demuestra la viabilidad de sustituir el carbonato cálcico precipitado (PCC) por tiesto cerámico cocido de pasta roja en compuestos de PVC, alcanzando propiedades técnicas satisfactorias para aplicaciones en construcción. Tras el tratamiento adecuado, se logró incorporar el tiesto en la matriz de PVC, obteniendo perfiles extruidos con buena estabilidad de procesado y un acabado superficial uniforme.

Aunque algunas propiedades mecánicas presentan una ligera disminución respecto a los compuestos con PCC, en determinadas condiciones de uso, los resultados confirman que el tiesto cocido es una alternativa viable y sostenible, que fomenta la reducción de residuos y la

disminución de la dependencia de recursos vírgenes, impulsando la economía circular en los sectores cerámico y del plástico.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ASCER. (2024). *Sector español de fabricación de baldosas cerámicas*. Extraído de [ASCER](#).
- [2] Chamayou, A., & Dodds, J. A. (2007). *Air Jet Milling*. En A. D. Salman, M. Ghadiri, & M. J. Hounslow (Eds.), *Handbook of Powder Technology* (Vol. 12, pp. 421-435). Elsevier Science B.V. [https://doi.org/10.1016/S0167-3785\(07\)12011-X](https://doi.org/10.1016/S0167-3785(07)12011-X)
- [3] Pegoretti, A., & Dorigato, A. (2024). *Polymer Composites: Reinforcing Fillers*. In *Encyclopedia of Polymer Science and Technology* (pp. 1–72). Wiley. <https://doi.org/10.1002/0471440264.pst130.pub2>
- [4] Sun, H., Hohl, B., Cao, Y., Handwerker, C., Rushing, T. S., Cummins, T. K., & Weiss, J. (2013). Jet mill grinding of portland cement, limestone, and fly ash: Impact on particle size, hydration rate, and strength. *Cement and Concrete Composites*, 44, 41-49. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.023>