



Received: 12-10-2019  
Accepted: 26-10-2019

Anales de Edificación  
Vol. 6, Nº2, 1-6 (2020)  
ISSN: 2444-1309  
Doi: 10.20868/ade.2020.4490

## Nuevos Compuestos de Vidrio Reciclado de Baja Temperatura para la Conservación Arquitectónica. New Low Temperature Glass Composites from Glasses Recycling, applied for Architectural Conservation.

M<sup>a</sup> Paz Sáez-Pérez<sup>a</sup>, Alberto Martínez-Ramírez<sup>b</sup>, M<sup>a</sup> Ángeles Villegas-Broncano<sup>c</sup>, Jorge A. Durán-Suárez<sup>d</sup>

<sup>a</sup> University Lecturer. Phd, Construction Architectural Department. Advanced Technical School of Building Engineering, University of Granada (mpsaez@ugr.es), <sup>b</sup> Becario de iniciación a la investigación. Conservation and Restoration Degree. University of Granada (albertomr@correo.ugr.es), <sup>c</sup> Phd, History Institute. CCHS, CSIC, Madrid (mariangeles.villegas@cchs.csic.es), <sup>d</sup> University Lecturer. Phd, Sculpture Department, University of Granada (giorgio@ugr.es)

---

**Resumen**—Mediante el uso de aglutinantes inorgánicos de silicato y desechos de vidrio (incolores o de color) es posible moldear elementos técnicos y artísticos, que luego pueden endurecerse mediante un proceso a alta temperatura. Este procedimiento está controlado por la temperatura de transición vítrea del aglutinante y de los residuos de vidrio utilizados como agregado. Para producir nuevos vidrios en estos casos se ha diseñado un nuevo compuesto hecho de aglutinante líquido (silicato de sodio) y vidrio molido como agregado de botellas de vidrio comunes (calcio de sodio) coloreadas o no coloreadas. Este compuesto se basa en la producción de geopolímeros. El "vidrio de agua", catalizado con hidróxido de sodio, se usó como aglutinante de fragmentos de vidrio de botellas industriales comunes, clasificadas con una distribución de tamaño de grano inferior a 2 mm. El análisis químico muestra la similitud del contenido de sílice entre el aglutinante y los agregados de vidrio reciclado, estableciéndose como principales diferencias en los porcentajes de óxidos de cromóforo. Además, las curvas de dilatometría de los dos materiales muestran valores cercanos de temperatura de transición vítrea (575 y 598°C, respectivamente), hecho que facilita la sinterización entre aglutinante y agregados. Las muestras no tratadas térmicamente presentan buenos valores de compactidad y resistencia mecánica, mejoradas con tratamiento térmico a 700°C. La alta compactidad de las muestras calentadas, que muestran granos de agregado redondeados y el ablandamiento del aglutinante, podrían ser una buena manera de obtener elementos técnicos bien consolidados, hechos de vidrio reciclado. De esta prueba, sería posible usar rangos térmicos entre 550 y 600°C, así como tiempos de exposición más cortos para un endurecimiento adecuado. Estos materiales constituyen un verdadero sustituto de procesos costosos, como la preparación de vidrio caliente. Estos nuevos productos mejoran las propiedades técnicas y la facilidad de uso de los polímeros orgánicos (por ejemplo, epoxi o poliéster). Los productos terminados mecánicamente con esta técnica se pueden completar mediante una mayor compactación con calentamiento a temperaturas cercanas a 500 ° C.

**Palabras Clave**— Nuevo compuesto; vidrio; fragmentos; geopolímero; baja temperatura.

---

**Abstract**—By using silicate inorganic binders and glass waste (colourless or coloured) it is possible to mould technical and artistic elements, which later can be hardened by means of high temperature processing. This procedure is controlled by both the glass transition temperature of binder and of glass waste used as aggregate. To produce new glasses in these cases have been designed a new compound made of liquid binder (sodium silicate) and ground glass as aggregate from common glass bottles (sodium calcium) colored or not colored. "Water glass", catalysed with sodium hydroxide was used as a binder of glass shards from common industrial bottles, classified to a grain size distribution below 2 mm. Chemical analysis shows similarity of silica content between binder and aggregates of recycled glass, establishing as main differences in the percentages of chromophore oxides. In addition dilatometry curves of the two materials show close glass transition temperature values (575 and 598°C, respectively), fact that facilitates sintering between binder and aggregates. The non-heat-treated samples present good compactness and mechanical resistance values, improved with heat-treatment at 700°C. The high compactness of heated samples, showing rounded aggregate grains and softening of binder could let a good way for obtaining well-consolidated technical elements, made of recycled glass. From this test, it would be possible to use thermal ranges between 550 and 600°C, as well as shorter exposure times for a proper hardening. These materials constitute a true substitute for expensive processes, such as the preparation of hot glass. These new products improve technical properties and ease of use that are organic polymers (e. g. epoxy or polyester). The products mechanically finished with this technique can be completed through further compaction with heating to temperatures close to 500 ° C.

**Index Terms**— New composite; glass; shards; geopolymer; low temperature.

## I. INTRODUCCIÓN

La restauración de elementos patrimoniales realizados en vidrio, así como la creación de nuevos elementos con valor técnico y artístico comporta un gran esfuerzo material y metodológico. Todo ello sirve para proponer la revisión de los métodos tradicionales de intervención y producción, donde puedan confluír la simplificación de las metodologías, la reducción de los costes energéticos y la reciclabilidad de materiales residuales.

Para producir nuevos vidrios con estas aplicaciones se plantea la utilización de aglomerante líquido de silicato sódico, catalizado con hidróxido sódico y vidrio molido, como agregado, clasificado en tamaños, a partir de botellas de vidrio común sódico cálcico coloreadas o no coloreadas, basándonos en el concepto de producción de geopolímeros (Provis and van Deventer, 2009; van Deventer et al., 2012; Turner and Collins, 2013; Villegas et al., 2017).

El objetivo final pretende la consecución de vidrios para diversas aplicaciones (restauradoras, técnicas y artísticas) con una simplificación de los procesos de producción y una reducción importante de la temperatura de fusión-sinterización. Todo ello sin minimizar la calidad final de los productos vítreos concerniente a compacidad y baja porosidad.

## II. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Los materiales de partida empleados en este estudio han sido áridos-agregados de vidrio y conglomerante silíceo. Concretamente, fragmentos de vidrio clasificados granulométricamente procedentes de botellas con color verde, cuyos tamaños no exceden de 2 mm.

Agglomerante geopolímero a base de silicato de sodio al 75%, catalizado con hidróxido de sodio al 25%.

La preparación de los morteros vítreos se hizo a partir de una mezcla de vidrio triturado, proporcionalmente al 80% en volumen, con un aglomerante de geopolímero al 20% en volumen.

Tras una mezcla homogénea de todos los componentes se compactó ligeramente en un molde de plástico de poliestireno. Posteriormente se procedió a su curado y fraguado en estufa a 40 °C durante 24 h.

Las muestras para su estudio se cortaron con una sierra eléctrica y disco diamantado a partir del curado en estufa. Una tanda de muestras se horneó hasta 700 °C durante 12 horas, para provocar, en su caso, una fusión parcial de los agregados y del aglomerante endurecido. La curva de calentamiento y fusión es la siguiente (figura 1).

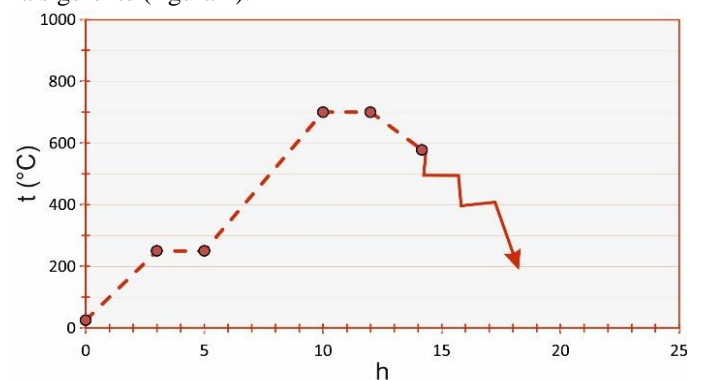


Fig. 1. Curva térmica (t / h) utilizada para la compactación de muestras a 700 °C en horno de cerámica.

### A. Técnicas de estudio

Se realizaron fotografías macroscópicas de las muestras no tratadas y de las muestras tratadas a alta temperatura (700 °C), realizadas con cámara fotográfica marca Canon EOS 5D-Mark IV provista de objetivo macro marca Canon MP-E de 65 mm f/2.8 1-5x.

El análisis químico del vidrio y aglomerante se realizó mediante fluorescencia de rayos X con un espectrómetro secuencial de longitud de onda dispersiva con generador de rayos X de 4 KW de potencia perteneciente al CIC-UGR, marca PHILIPS Magix Pro (PW-2440).

La caracterización de las propiedades térmicas del aglomerante y agregados se realizaron a partir del estudio de sus curvas dilatométricas. Se utilizó un dilatómetro diferencial marca Netzsch Gerätebau, modelo 402EP que permite medir el coeficiente de dilatación ( $\alpha$ ) y la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ).

Por último el estudio morfológico y análisis elemental de las muestras sin compactación térmica y con compactación térmica a 700 °C, se llevó a cabo mediante Microscopio Electrónico de Barrido de Alta Resolución por emisión de campo, marca GEMINI (FESEM) CARL ZEISS (CIC-UGR), dotado de Sistema de Análisis Químico-EDX.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos se exponen a continuación.

El estudio visual realizado mediante fotografía macroscópica no distingue el aglomerante a base de vidrio líquido en ninguna de las muestras (40 °C/24 h-700 °C/12 h) compactando los agregados de vidrio.

En ambos casos parece que la compactación de las muestras es muy buena aunque las tratadas térmicamente a 700 °C muestran un redondeamiento de los agregados y fusión parcial por contacto (figura 2).



Fig. 2. Fotografía macro de muestras compactadas con geopolímeros (izquierda) y térmicamente a 700 °C (derecha). Tenga en cuenta el redondeo de los agregados de vidrio después del tratamiento térmico (derecha) y su mejor compactación.

El análisis químico muestra la similitud del contenido de sílice entre el aglomerante y el agregado de vidrio reciclado, siendo las principales diferencias los porcentajes de los óxidos

de cromóforo. Ambos materiales tienen afinidad y no deben presentar problemas debido a la incompatibilidad química (TABLA 1 y figura 3).

TABLA I  
ANÁLISIS QUÍMICO (% EN PESO) OBTENIDO POR ESPECTROMETRÍA XRF DE LOS AGREGADOS Y EL AGLOMERANTE DE VIDRIO SOLUBLE (ND: NO DETERMINADO).

Oxides	Green glass aggregates	Binder made of "water glass"
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.92	1.06
CaO	10.80	ND
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.31	ND
K <sub>2</sub> O	0.95	1.14
MgO	0.87	ND
SiO <sub>2</sub>	72.30	76.70
Na <sub>2</sub> O	12.60	21.10
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.19	ND
SrO	0.03	ND
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.92	1.06

En relación al comportamiento térmico del aglomerante y de los agregados, los valores concernientes a la temperatura máxima, el coeficiente de dilatación lineal y la temperatura de transición vítrea son igualmente similares. (Ver TABLA 2).

TABLA II  
PARÁMETROS TÉRMICOS DE LOS MATERIALES DE PARTIDA OBTENIDOS A PARTIR DE SUS CURVAS DILATOMÉTRICAS.

Parameters	Green glass aggregates	Binder made of "water glass"
Maximum test temperature (°C)	689	659
Linear expansion coefficient $\alpha$ ( $\times 10^{-6}$ K <sup>-1</sup> )	9,44	8,80

Existen pequeñas diferencias entre ambos materiales que pueden facilitar futuros trabajos de compactación térmica de los manufacturados con una temperatura de sinterización inferior a los 700 °C, tal como se ha realizado en nuestro estudio.

De igual manera, el menor valor de expansión lineal del aglomerante podrá facilitar una mayor unión de los agregados después del proceso de compactación térmica, durante el enfriamiento de los nuevos materiales manufacturados.

Los resultados de microscopía electrónica de barrido (figuras 5 a 10) indican en las muestras compactadas a baja temperatura una buena unión, reforzada por la adhesión del polímero inorgánico silíceo a los granos de vidrio.

Es el caso de la figura 5, donde se han coloreado en verde los fragmentos de vidrio y se han señalado en color rojo las áreas de relleno del polímero. El adhesivo a base de water glass ha endurecido muy bien con la proporción de catalizador sódico,

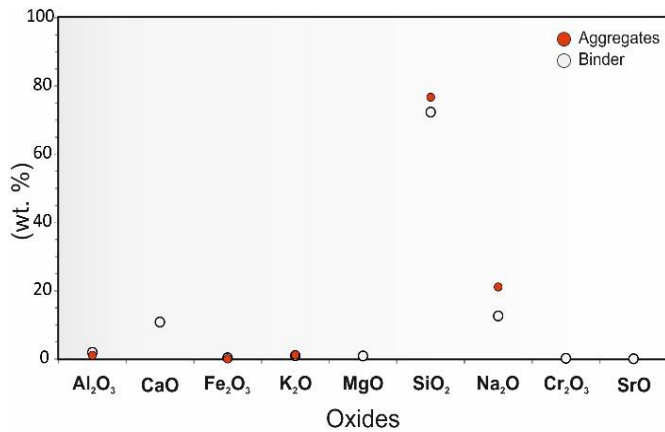


Fig. 3. Análisis químicos (% en peso) diferencias entre agregados y aglutinante, materiales de partida utilizados en este estudio.

incorporado a la mezcla, así como la activación térmica de baja temperatura (40 °C/24 h). No son visibles poros (con esta temperatura de curado) en el aglomerante, al igual que los agregados no aparecen redondeados.

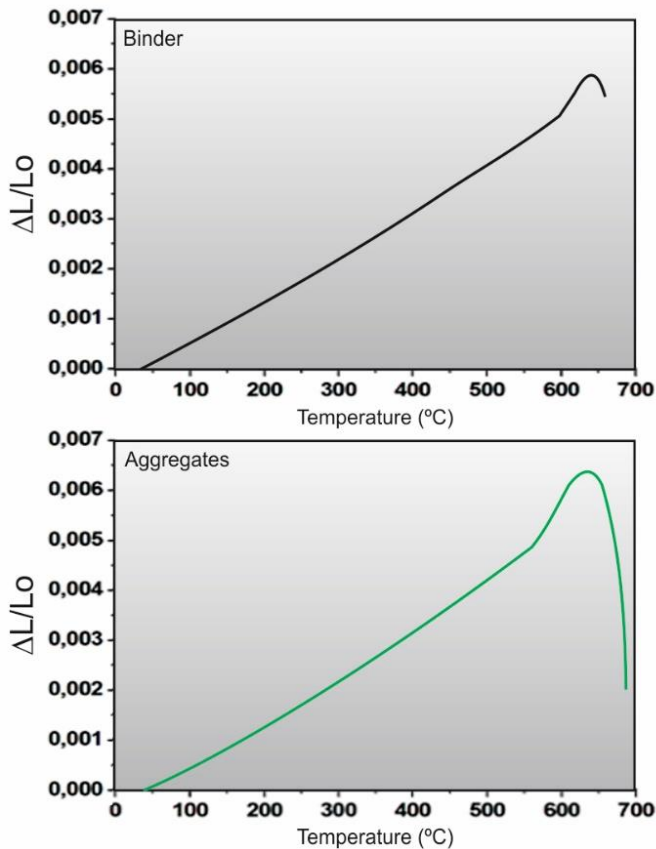


Fig. 4. Curvas dilatométricas que muestran el comportamiento térmico del aglomerante y los agregados utilizados en este estudio (registrado con un dilatómetro diferencial Netzsch Gerätebau).

La porosidad aparece en algunas superficies de los agregados con forma de reticulado, a consecuencia de la contracción del aglomerante y de la poca cantidad depositada en algunas áreas (figura 6).

Finalmente, se enfatiza la porosidad superficial del aglomerante, sin significación importante en relación a la

compactación de las muestras, así como los análisis EDX de los áridos y el aglomerante (figura 7). El árido de vidrio indica presencia mayoritaria de Si, con proporciones de Ca y Na. No aparecen los elementos cromóforos. El análisis EDX del aglomerante indica presencia masiva de Si y elevado contenido de Na, consecuencia del catalizador y de la naturaleza de water glass.

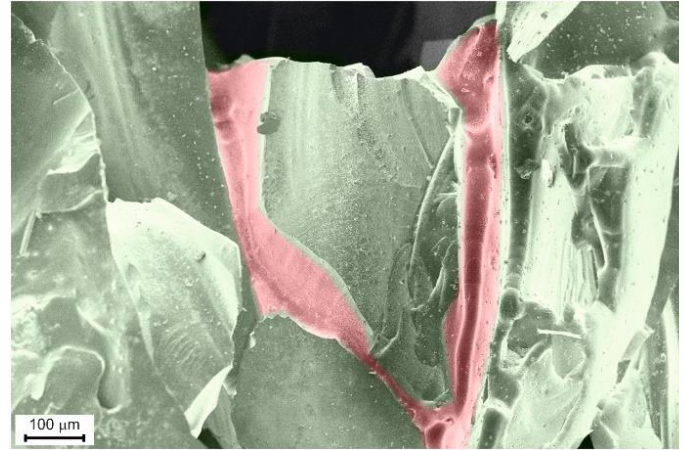


Fig. 5. Detalle de mortero de agregados de vidrio con aglomerante a base de water glass. Nótense los bordes cortantes de los agregados, en color verde. El aglomerante rellena los los poros y fisuras adecuadamente, en color rojo.

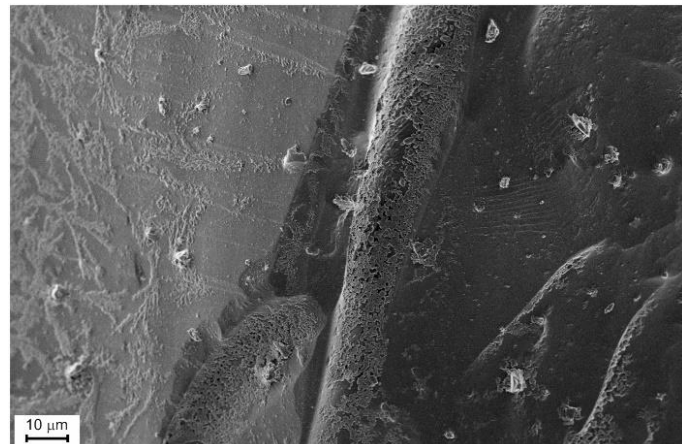


Fig. 6. Fotografía textural de SEM donde se puede apreciar el relleno del water glass y el tapizado reticular del aglomerante en determinados granos de vidrio.

Por otra parte, las muestras sometidas a compactación térmica (700 °C/12 h) presentan con claridad los granos redondeados por efecto de la temperatura elevada y una semi fusión del aglomerante que mejora la compactación entre los diferentes elementos (figura 8).

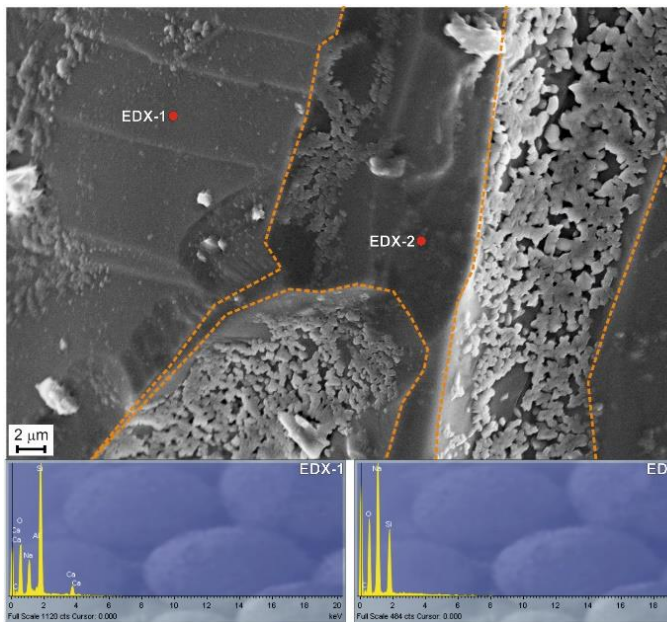


Fig. 7. Detalle de la muestra compactada a 40 °C/24 h, destacando la sólida unión del aglomerante con los agregados de vidrio (definidos por una línea discontinua de color naranja) y porosidad secundaria en algunos bordes de los áridos. Análisis EDX de árido (EDX 1) y aglomerante (EDX 2).

Es destacable con este tratamiento que la variación volumétrica de las muestras no es demasiado elevada, aunque si se observa una buena compactación. Se puede inferir que el tratamiento de compactación ha tenido mayor temperatura de la necesitada (figura 9) debido a la aparición de núcleos de cristalización (efecto secundario) en los agregados de vidrio y a la “ebullición” del aglomerante de water glass por la presencia de burbujas superficiales.

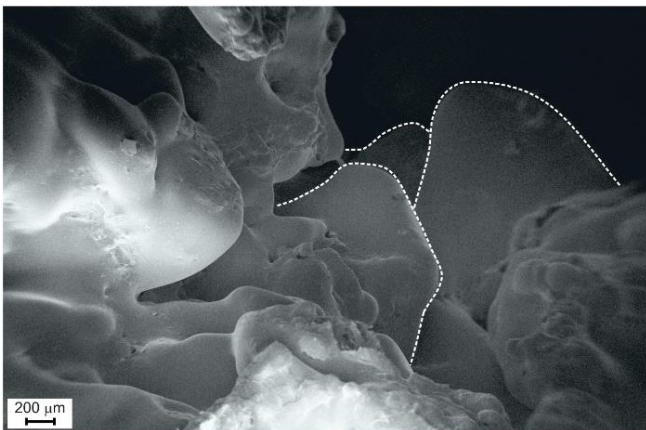


Fig. 8. Imagen de SEM de muestras sometidas a compactación térmica. Se observan los granos redondeados (líneas discontinuas blancas) y el aglomerante fundido en las superficies de los agregados de vidrios, poros e intersticios.

La imagen de la figura 10, pone de manifiesto una unión perfecta entre aglomerante (water glass) y el agregado de vidrio, así como los citados núcleos de cristalización secundaria en los agregados de vidrio.

Los análisis EDX del aglomerante y los agregados responden a los medidos en muestras compactadas sin temperatura elevada (figure 10).

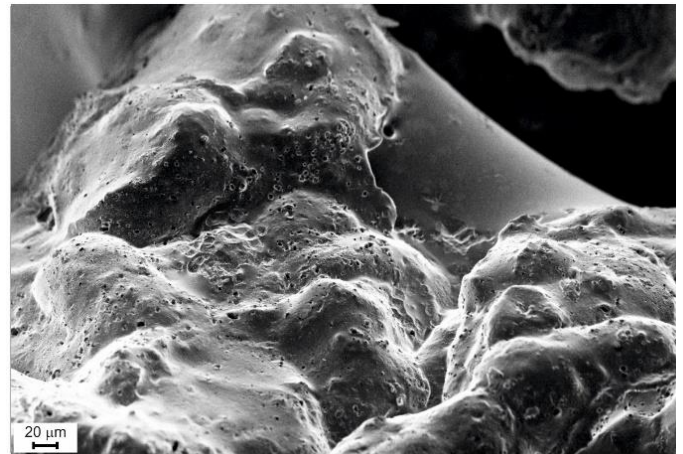


Fig. 9. Detalle de muestras sometidas a compactación térmica (700 °C/12 h) donde se puede apreciar la fusión parcial de los agregados y del aglomerante.

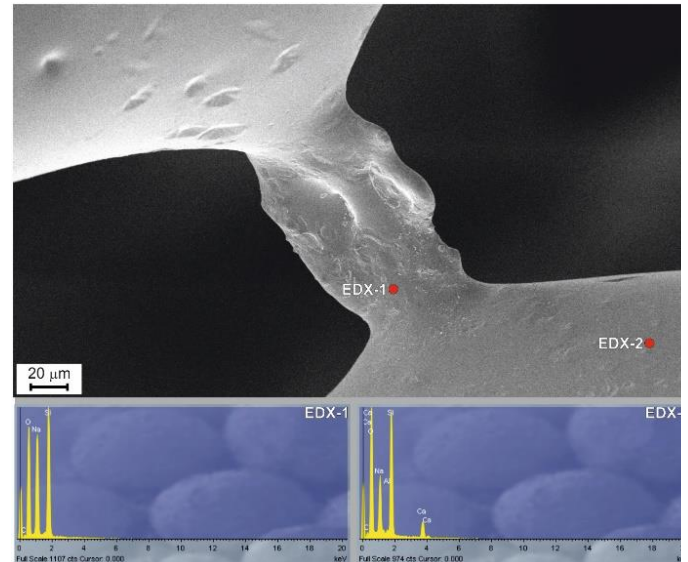


Fig. 10. Imagen SEM destacando la unión perfecta entre aglomerante de Water Glass y los agregados de vidrio triturado. Se observan núcleos de cristalización en la superficie de los áridos.

#### IV. CONCLUSIÓN

La fabricación de productos manufacturados con fragmentos de vidrio, a partir de vidrio de reciclaje y aglomerantes silíceos inorgánicos water glass es una excelente alternativa a la producción industrial, técnica y artística como concepto de sostenibilidad. Por otra parte la aplicación de estos productos en campos específicos como la arquitectura, decoración o la restauración patrimonial supone grandes ventajas para el ahorro energético y material.

La obtención compactada a baja temperatura (40 °C/24H) de estos compuestos tiene grandes ventajas y genera materiales de gran utilidad y durabilidad. El ahorro en los procesos y

materiales es muy elevado, pudiendo ser tratados y mecanizados con garantía a partir de las 24 horas de su preparación. Son un verdadero sustituto de procesos costosos como lo son la preparación de vidrios en caliente e incluso mejora las propiedades y facilidad de manejo que tiene los polímeros orgánicos (e. g. epoxy o poliestéricas).

Los productos acabados mecánicamente con esta técnica pueden ser completados mediante la compactación ulterior con calentamiento a temperaturas superiores a 500 °C.

Por otra parte si se pretenden productos de mayor compactación la utilización de la técnica de calentamiento a 700° C, es muy adecuada, pues los productos tratados no experimentan deformaciones excesivas ni cambios significativos de volumetría, aunque el coste económico en recursos y energía es mucho mayor.

Es posible conseguir resultados mecánicos y de compactación superficial muy próximos a los definidos en este estudio con la utilización de menor temperatura. Rangos térmicos de 550 a 600 °C, podrían ser suficientes para consolidar adecuadamente estos productos manufacturados, al igual que menores tiempos de exposición al calor, por lo que se minimizarían los costes globales, así como deformaciones lineales y cambios en la volumetría de los objetos.

## AGRADECIMIENTOS

La investigación presentada en este documento se llevó a cabo bajo los auspicios de los Grupos de Investigación RNM 0179 y HUM 629 de la Junta de Andalucía y el Programa REMINE de Investigación e Innovación Horizonte 2020 Acciones Marie Skłodowska-Curie.

## REFERENCIAS

- Provis, L. and van Deventer, J.S.J. (2009) (eds), Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications, Woodhead Publishing, Cambridge.
- van Deventer, J.S.J.; Provis, J.L. and Duxson, P. (2012). Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement. *Miner. Eng.*, 29, pp.: 89-104.
- Turner, L. and Collins, F. (2013). Carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete *Const. & Build. Mat* 43, 125-130.
- Villegas, M. A., Durán Suárez, J. A., Fernández Navarro, J. M. and Sorroche Cruz, A. (2017). *The glass sculpture*. Ed. University of Granada, 350 p.



**Reconocimiento – NoComercial (by-nc):** Se permite la generación de obras derivadas siempre que no se haga un uso comercial. Tampoco se puede utilizar la obra original con finalidades comerciales.