FUSIÓN DE FRITAS CERÁMICAS MEDIANTE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

M. Aguilella [1]; J.M. Tiscar [1]; E. Monfort [1]; J. Boix [1]); M.J. Vicente [1]
J. Jordan [2]

[1] Instituto de Tecnología Cerámica (ITC). Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas (AICE). Universitat Jaume I. Castellón. España.
[2] SICtech Induction. Valencia. España.

RESUMEN

La industria de fabricación de baldosas cerámicas se enfrenta al desafío de descarbonizar sus procesos productivos para reducir las emisiones de CO_2, provenientes, principalmente, de sus etapas de tratamiento térmico. Dentro del proceso cerámico, una de las etapas más intensivas en el uso de energía es la de fusión para obtener las fritas cerámicas empleadas en la preparación de esmaltes, la cual tiene lugar en hornos de fusión continua a temperaturas de en torno a 1500ºC. En estos hornos el material precursor de la frita es una mezcla homogénea de diferentes materias primas en estado pulverulento, el cual es alimentado de manera continua a la cámara de fusión. A medida que el material va fundiéndose este es evacuado de la cámara por una vertedera calefactada que vierte el fundido sobre un baño refrigerado de agua en el que se produce el enfriamiento súbito del mismo, dando lugar al material vítreo que constituye la frita. El aporte de calor en estos hornos se realiza mayoritariamente por combustión de gas natural empleando aire u oxígeno como agente comburente.

La electrificación es una alternativa prometedora para la descarbonización de este proceso, la cual puede abordarse de diferentes formas como, por ejemplo, el calentamiento por efecto Joule con resistencias eléctricas, la generación de calor en el seno del material a fundir por efecto de un campo de microondas, la utilización de electrodos sumergidos en el fundido o el calentamiento por efecto de la inducción electromagnética. Actualmente no existen en el mercado equipos eléctricos específicos para la fusión de fritas cerámicas que utilicen alguna de estas tecnologías.

La inducción electromagnética es ampliamente utilizada en la fusión de metales, pero compleja de aplicar en la fabricación de materiales vítreos como las fritas, debido a la elevada resistividad eléctrica que presentan las materias primas empleadas en su fabricación, lo que impide la inducción de corrientes eléctricas en el material que permitan su calentamiento. En el presente trabajo se ha llevado a cabo una prueba de concepto de fusión para obtener fritas cerámicas mediante inducción electromagnética con el objetivo de electrificar el proceso de fabricación a escala piloto, con energía limpia, bajas en emisiones y con un elevado control de proceso.

1. INTRODUCCIÓN

El Pacto Verde Europeo tiene como objetivo alcanzar la neutralidad en emisiones de gases de efecto invernadero en el año 2050. La descarbonización de las industrias de consumo intensivo de energía es esencial para alcanzar este propósito [1]. Dentro de la hoja de ruta para alcanzar este objetivo se incluyen medidas como:

- Reducción de las emisiones de CO_2, mediante la selección de las materias primas y/o el incremento de la eficiencia energética.
- Cambio a fuentes de energía renovables (hidrogeno verde, biocombustibles, electricidad verde).
- Captura de CO_2.
- Otras tecnologías de eliminación de carbono.

En el proceso de fabricación de vidrio plano, hueco, doméstico, filamento, lana mineral, etc., la forma más común y convencional de aportar calor para fundir el vidrio es mediante la quema de combustibles fósiles. En ocasiones, a este aporte de energía primario procedente de la combustión se utiliza energía eléctrica a través de electrodos sumergidos en el fundido. Esta técnica mejora la transferencia de energía en el fundido y se conoce comúnmente como “boosting”.

Según la literatura [1-2], en aplicaciones específicas como la producción de lanas de vidrio aislante de alta temperatura o en hornos de pequeño volumen para vidrios especiales, pueden encontrarse hornos eléctricos. En hornos de pequeño tamaño, la eficiencia de la quema de combustibles fósiles disminuye debido a que las pérdidas térmicas por tonelada de material fundido son significativamente altas. La mayor eficiencia del calentamiento eléctrico y su mayor capacidad de fusión por unidad de superficie provoca que la diferencia en el coste de la energía eléctrica en comparación con el del combustible fósil se compense para hornos de pequeñas dimensiones. Sin embargo, para que la corriente eléctrica pueda circular a través del vidrio y calentarlo, este debe estar previamente fundido, lo que implica el uso de combustibles fósiles al inicio de la fusión. Además, estos hornos tienen una vida relativamente corta, que varía entre 2 y 7 años según el tipo de vidrio producido y las condiciones de operación. En cualquier caso, esta forma de calentamiento eléctrico para la fabricación de vidrio está muy poco extendida [2-3].

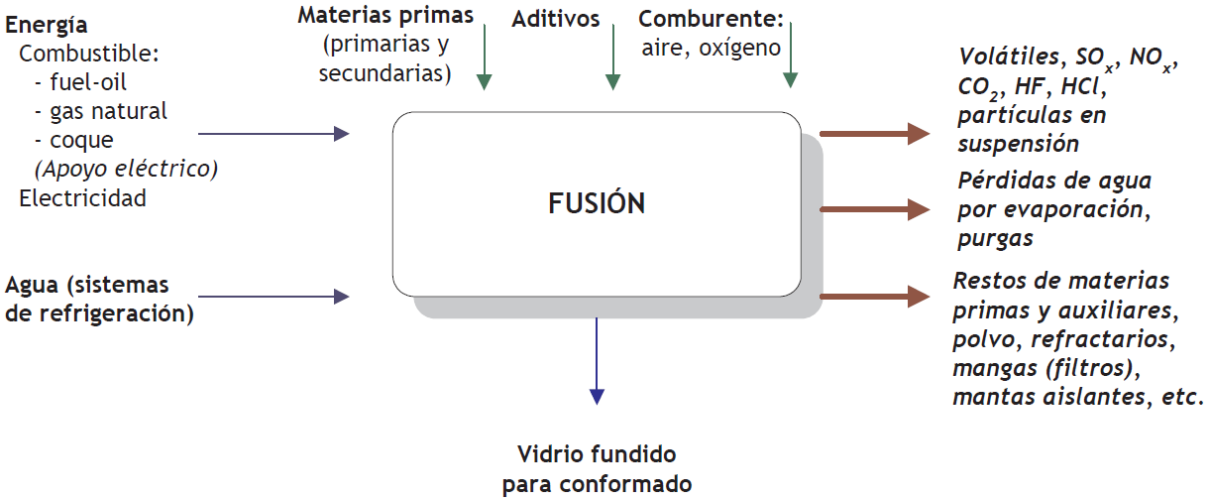

Figura 1. *Aspectos medioambientales en la etapa de fusión del proceso de fabricación del vidrio [3].*

Los hornos utilizados en la fabricación de fritas cerámicas son notablemente más pequeños que los utilizados en la producción de vidrio. En la actualidad, la capacidad productiva de la mayoría de los hornos no supera las 20 toneladas por día. En estos hornos, la fuente de calor se genera a través de la combustión de gas natural, utilizando aire u oxígeno como agente comburente. Hasta el momento, no se conocen experiencias en el uso de hornos eléctricos de fusión a escala industrial, su uso se limita a hornos de laboratorio.

La electrificación se perfila como una alternativa prometedora para la descarbonización de este proceso, y puede ser abordada con distintas técnicas de calentamiento, como las resistencias eléctricas, la aplicación de microondas, los electrodos sumergidos, el calentamiento por inducción electromagnética o una combinación de estas.

Aunque la inducción electromagnética se utiliza ampliamente en la fusión de metales, su aplicación en la fabricación de materiales vítreos como las fritas es más compleja debido a su elevada resistividad eléctrica que presentan las materias primas en estado sólido, lo que impide la inducción de corrientes eléctricas de calentamiento en el seno del material. A pesar de esto, la exploración de este tipo de calentamiento se debe a las ventajas que ofrece en comparación con otros métodos. Algunas de estas ventajas incluyen una alta productividad al calentar directamente el material, una elevada eficiencia energética, la facilidad de automatización del control de temperatura mediante un lazo cerrado, la preservación de la calidad del producto al evitar el contacto con llamas o cuerpos extraños, y la posibilidad de utilizar fuentes de energía sostenibles.

El calentamiento por inducción implica la generación de intensos campos magnéticos, que son utilizados para inducir corrientes en una pieza de material conductor. La bobina que genera estos campos magnéticos se denomina inductor. En el calentamiento por inducción electromagnética la corriente alterna de red se convierte en corriente continua mediante un generador de corriente, luego se transforma en corriente alterna a la frecuencia deseada mediante un oscilador y se aplica al inductor. El campo magnético generado en el inductor induce corriente en la pieza, calentándola en consecuencia, siempre que el material tenga una baja resistividad, es decir, sea conductor eléctrico [4].

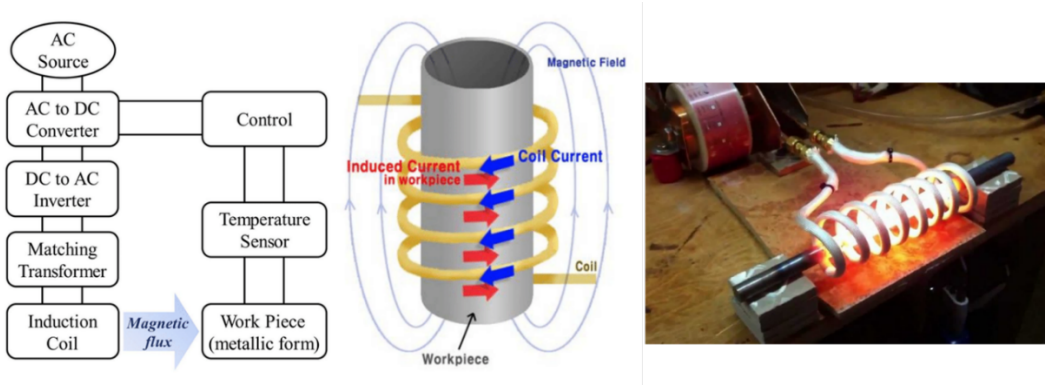

***Figura 2. a**) Principio de calentamiento por inducción. b) Material conductor calentándose por inducción.*

Las técnicas de fusión de materiales basadas en la aplicación de inducción electromagnética se dividen en dos categorías principales: calentamiento indirecto y calentamiento directo. En el primer grupo, el material se funde debido al calor generado por elementos auxiliares que alcanzan altas temperaturas gracias a la inducción electromagnética. En cambio, en el segundo grupo, el propio material que se desea procesar (carga) se calienta debido a su susceptibilidad al campo magnético generado.

Dentro de las técnicas de fusión directa, puede distinguirse entre el método de crisol caliente, donde la fusión ocurre en un crisol refractario calentado por el material fundido, y el método de crisol frío, en el cual la fusión se lleva a cabo en un crisol metálico, generalmente de cobre, que se enfría de manera continua. Esto crea una fina capa de vidrio solidificado entre el crisol y la carga fundida, que actúa como aislante térmico, evitando que el crisol se funda. Este último método es más costoso que el primero y se utiliza únicamente en situaciones en las que es crucial evitar la contaminación del material fundido, como, por ejemplo, en los procesos de fusión de titanio. [5]

Para lograr un proceso de fusión en continuo en la fabricación de fritas mediante calentamiento por inducción es imprescindible superar un obstáculo inicial crucial: la naturaleza aislante eléctrica del material cerámico en polvo a temperatura ambiente. Es decir, la inducción electromagnética de por sí no es capaz de calentar directamente el material en polvo precursor de las fritas. No obstante, según se refleja en la bibliografía consultada, ciertas composiciones que forman vidrio pueden volverse lo suficientemente conductoras una vez fundidas, permitiendo su calentamiento mediante esta técnica a unas determinadas frecuencias de trabajo en el inductor [6]. Esto implica que el calentamiento inicial del polvo se realice de manera indirecta, utilizando elementos susceptores que se calienten por efecto de la inducción y que transfieran el calor al polvo, provocando su fusión.

2. OBJETIVO

Este estudio se enfoca en la evaluación de la viabilidad técnica para llevar a cabo la fusión de fritas cerámicas mediante calentamiento directo a través de la inducción electromagnética. El propósito final es el de electrificar el proceso de fabricación a escala piloto, con energía limpia, minimizando las emisiones y garantizando un alto nivel de control del proceso.

3. MATERIALES Y EQUIPOS

3.1. COMPOSICIONES ESTUDIADAS

En la tabla 1 se muestra la composición química de los óxidos mayoritarios de tres fritas comerciales seleccionadas para el estudio. La elección se realizó en base a las diferencias significativas en su capacidad fundente y contenido de elementos alcalinos y alcalinotérreos. Se ha medido la temperatura de fusión de las tres composiciones estudiadas mediante microscopio de calefacción. Se obtiene una temperatura de fusión para la composición A de 1060ºC, 1165ºC para la composición B y 1385ºC para la C.

Óxido	A (%)	B (%)	C (%)
SiO_2	51-55	57-61	62-66
Al_2O_3	11-15	4-8	7-11
B_2O_3	5-7	2-4	8-10
R_2O^*	19	6	8
RO^{**}	3	17	6
ZrO_2	6	0	0
ZnO	0	10	4

* Na_2O y K_2O. ** CaO, MgO y BaO.

***Tabla 1**. Composición química en óxidos de las fritas estudiadas (% en peso).*

3.2. SISTEMA DE MEDIDA DE PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE FUNDIDOS

La capacidad de un material fundido para ser calentando mediante inducción electromagnética está estrechamente relacionada con su resistividad eléctrica [6]. Para medir este parámetro eléctrico, se ha utilizado un método de medida de baja precisión basado en la conducción de corriente eléctrica entre dos electrodos sumergidos en el fundido, el cual permite determinar la impedancia eléctrica del material [7] [8] [9]. Para convertir la medida de impedancia eléctrica en resistividad eléctrica se necesita calibrar, previamente, la celda de medida. Este proceso de calibración se ha realizado utilizando como patrones disoluciones de cloruro potásico de calidad analítica y conductividades conocidas [10].

***Figura 3.** Detalle del crisol y electrodos de medida empleados en la caracterización de las propiedades eléctricas de los fundidos.*

3.3. HORNO DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Para investigar los procesos de fusión de fritas por inducción electromagnética se ha desarrollado y construido un prototipo específico, que permite evaluar la fusión mediante esta técnica (figura 4).

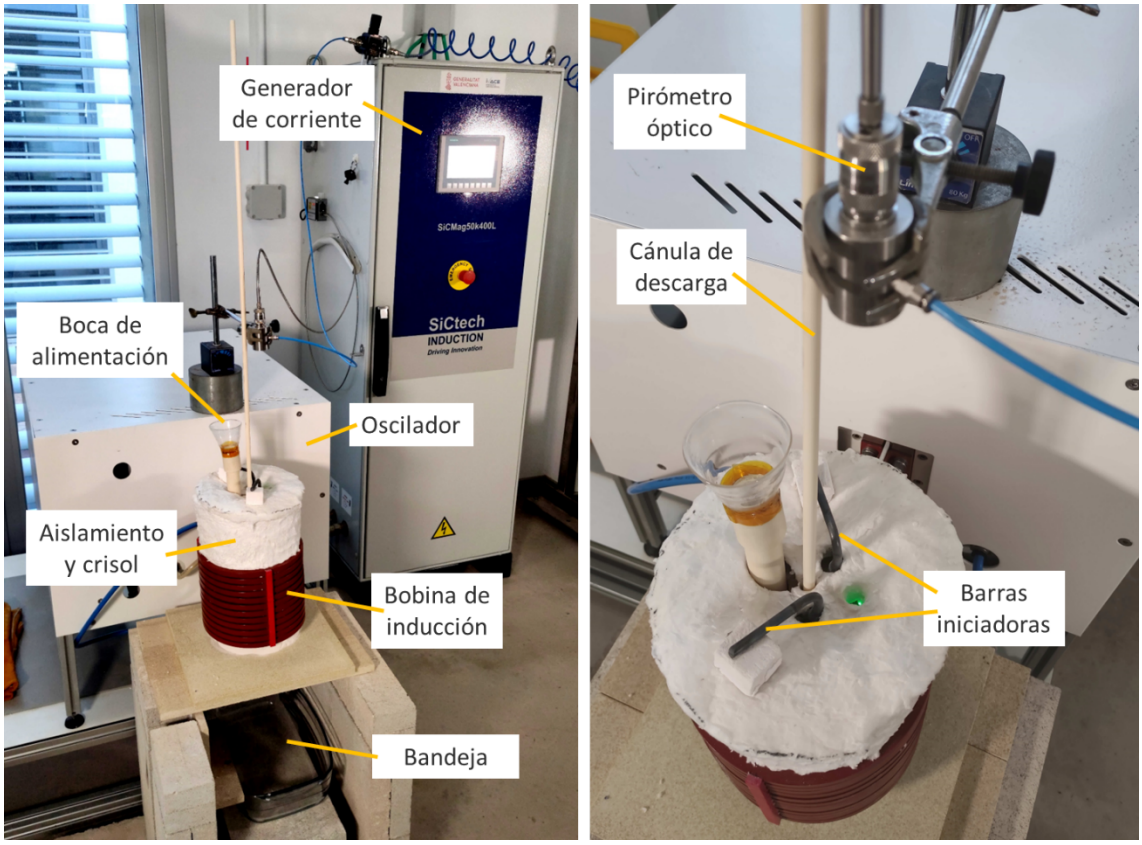

Figura 4. *Vista general y detalle del prototipo desarrollado para realizar estudios sobre la fusión de fritas cerámicas mediante inducción electromagnética*

En el panel principal de control se encuentra una parte de la instalación eléctrica, el PLC de control del equipo y el generador de corriente. La corriente generada se transforma en el oscilador y se aplica en la bobina del inductor generando el campo magnético. Para mantener la temperatura adecuada, todo el sistema está refrigerado por agua a través de un sistema en bucle cerrado.

Dentro de la bobina del inductor se coloca un crisol de alúmina junto a un aislamiento confeccionado en fibra de alta temperatura. El montaje experimental se completa con una tapa de material refractario que alberga las barras iniciadoras de la fusión, una abertura para la alimentación del polvo a fundir, un pirómetro óptico para medir la temperatura del material y una cánula que actúa de válvula de descarga para controlar el vertido del material fundido dentro de un baño de agua a través de un orificio practicado en el fondo del crisol.

4. RESULTADOS

4.1 MEDIDA DE PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE FUNDIDOS

Para determinar la resistividad eléctrica de los fundidos se llena un pequeño crisol de alúmina con la muestra en polvo precursora de la frita a analizar. Posteriormente, el crisol se ubica en el interior de un horno de alta temperatura con los electrodos posicionados cerca de la superficie de la muestra, pero sin que haya contacto físico. Una vez que se alcanza la temperatura deseada, se hacen descender lentamente los electrodos hasta que se obtiene una lectura de impedancia. En este punto se introducen los electrodos una distancia adicional dentro del fundido, tomando esta distancia de inmersión como referencia en los sucesivos ensayos realizados con las distintas muestras.

Con los electrodos correctamente posicionados, se lleva a cabo un barrido de medidas de impedancia a distintas frecuencias y temperaturas del fundido. La figura 5 ilustra las medidas de impedancia eléctrica realizadas para la muestra B a tres temperaturas del fundido. Se observa claramente que la medida de impedancia eléctrica está notablemente influenciada por la temperatura. A medida que aumenta la temperatura, se incrementa la movilidad iónica y disminuye la impedancia eléctrica [7].

Estas mediciones de impedancia eléctrica se realizaron para las tres muestras de frita a tres temperaturas de fusión diferentes. En la figura 5 se presentan los resultados de la transformación de la medida de impedancia a resistividad eléctrica para las tres muestras. Se observa que la resistividad eléctrica guarda una relación de tipo Arrhenius con la temperatura, destacando, además, una marcada disparidad en los valores de resistividad según la muestra analizada.

La muestra A es la única que presenta valores de resistividad por debajo de los 10 Ω·cm y una baja sensibilidad con la temperatura. Esto podría deberse a su menor temperatura de fusión y a una composición rica en elementos alcalinos, que tienen un radio iónico más pequeño y, por lo tanto, una mayor movilidad iónica bajo la influencia de un campo eléctrico [9].

En contraste, la muestra B exhibe la resistividad eléctrica más alta de todas las muestras analizadas y una alta dependencia con la temperatura. Esta muestra tiene un punto de fusión más alto y es rica en elementos alcalinotérreos y zinc, iones con un radio iónico más grande [11].

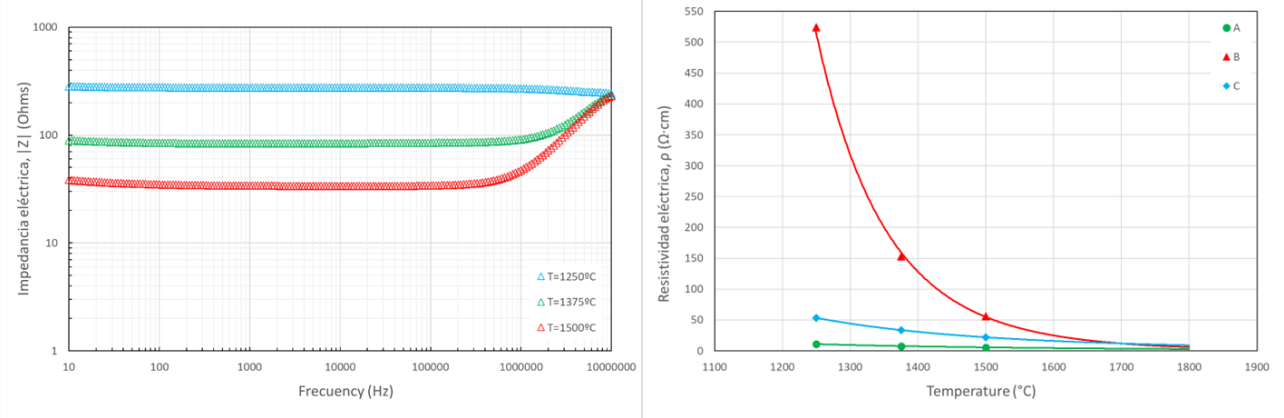

Figura 5. *Impedancia eléctrica frente a la frecuencia de medida para la muestra B a tres temperaturas (izquierda). Resistividad eléctrica frente a la temperatura de las muestras A, B y C (derecha).*

4.2 ENSAYOS DE FUSIÓN MEDIANTE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

4.2.1. ENSAYOS DE FUSIÓN ESTÁTICOS

Inicialmente, los ensayos se centraron en verificar si el proceso de fusión de frita cerámica podía llevarse a cabo mediante inducción electromagnética una vez que el polvo precursor se encontraba fundido y se habían retirado las barras iniciadoras. En la figura 6 se presenta la evolución de la temperatura del material y de la intensidad de corriente aplicada durante un ensayo de mantenimiento de temperatura de la frita A. El crisol se cargó con 350 gramos de material y se aplicó potencia de forma gradual para evitar la rotura del crisol, hasta alcanzar los 1100°C. En este punto se añadió más material al crisol hasta disponer de una masa total de 750 gramos. Se observa cómo, con cada adición, la medida de temperatura del material disminuye debido a que parte del polvo añadido se coloca debajo de la mirilla de lectura (1). Al alcanzar los 1400°C se retiraron las barras iniciadoras (2), lo que provocó una disminución de la temperatura, que se compensó aumentando la potencia aplicada. Para confirmar definitivamente que la frita fundida era capaz de calentarse y fundirse mediante inducción, se realizaron dos nuevas adiciones de 100 gramos de material, observándose cómo la temperatura se recuperaba (3). Cuando se alcanzaron nuevamente los 1400°C se interrumpió la inducción (4); permitiendo que el crisol se enfriara y al alcanzarse los 1100°C, antes de que la frita solidificara, se volvió activar la inducción (5) y se observó como la temperatura del material siguió aumentando (6). Con esta experiencia quedó comprobado que esta composición de frita puede calentarse mediante inducción sin necesidad de un elemento o fuente externa auxiliar una vez que la frita se encuentra en estado líquido.

En la figura 7 se muestran los ensayos de mantenimiento de temperatura después de retirar las barras para las fritas B y C. En estos ensayos se cargó una mayor cantidad de inicial de material y se realizó una única adición de material adicional (1) para alcanzar un total de 750g totales, como en el ensayo anterior. Se aplicó potencia de manera gradual hasta que la frita alcanzó los 1500ºC, momento en el cual se retiraron las barras (2). Se observa que, a pesar de aumentar la potencia al extraer las barras, la temperatura del fundido disminuye rápidamente. Se concluye que, para estas composiciones de frita con la potencia reactiva y frecuencia de trabajo actuales, no es posible mantener la fusión sin la ayuda de un elemento auxiliar.

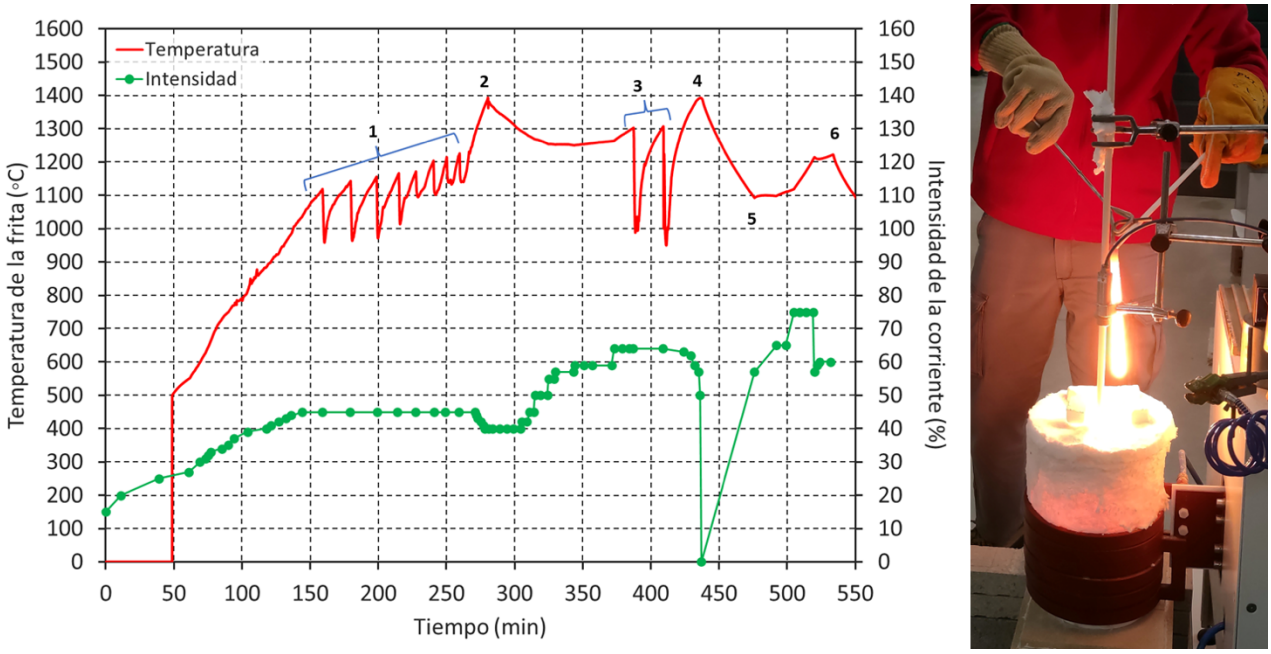

Figura 6. *Evolución en el tiempo de los parámetros más significativos durante un ensayo de fusión de la frita A (izquierda). Detalle de la extracción de las barras iniciadoras (derecha).*

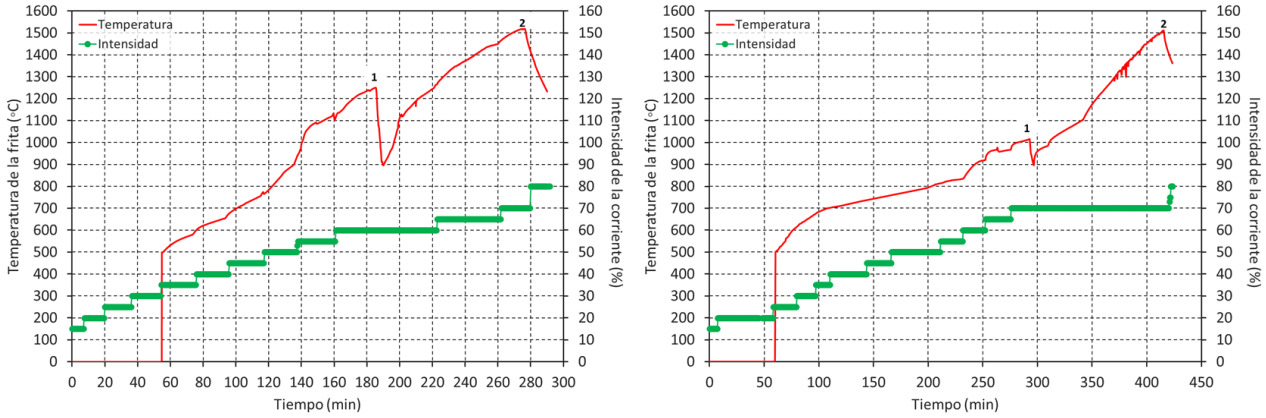

Figura 7. *Evolución en el tiempo de las variables de proceso durante ensayos de fusión de la frita B (izquierda) y C (derecha).*

4.2.2. ENSAYOS DE FUSIÓN DINÁMICOS

Además de las pruebas de mantenimiento de temperatura, se han realizado pruebas de fritado, utilizando la técnica de inducción, a través del orificio existente en la base del crisol. Este orificio, obturado por la cánula durante el calentamiento, permite que la frita fluya hacia el recipiente inferior lleno de agua, lo que provoca un enfriamiento súbito del fundido y obtención de material vitreo. En la figura 8 se muestra el ensayo de calentamiento y fritado para la muestra A. El crisol se carga con una masa inicial y, al alcanzar los 1000ºC, se realizan varias adiciones de material hasta alcanzar un total de 750g (1).

Seguidamente, se aumenta la temperatura del fundido por encima de 1300ºC, se extraen las barras iniciadoras (2) y se ajusta la potencia para mantener una temperatura de 1300ºC (3). En ese momento, se retira la cánula que obstruye el orificio, pero no se produce la descarga debido a la alta viscosidad del fundido. Por ello, se incrementa la potencia hasta alcanzar los 1400ºC, momento en el que se vuelve a abrir el orificio (4). A esta temperatura la viscosidad del fundido ha disminuido lo suficiente para poder obtener frita, aunque de manera discontinua, por lo que se aumenta la temperatura hasta 1500ºC (5). A esta temperatura se logra fritar de manera continuada hasta vaciar completamente el crisol. Se realiza un control cerámico de la frita obtenida, comparándola con la frita comercial producida con la misma composición, obteniendo las mismas propiedades y acabado.

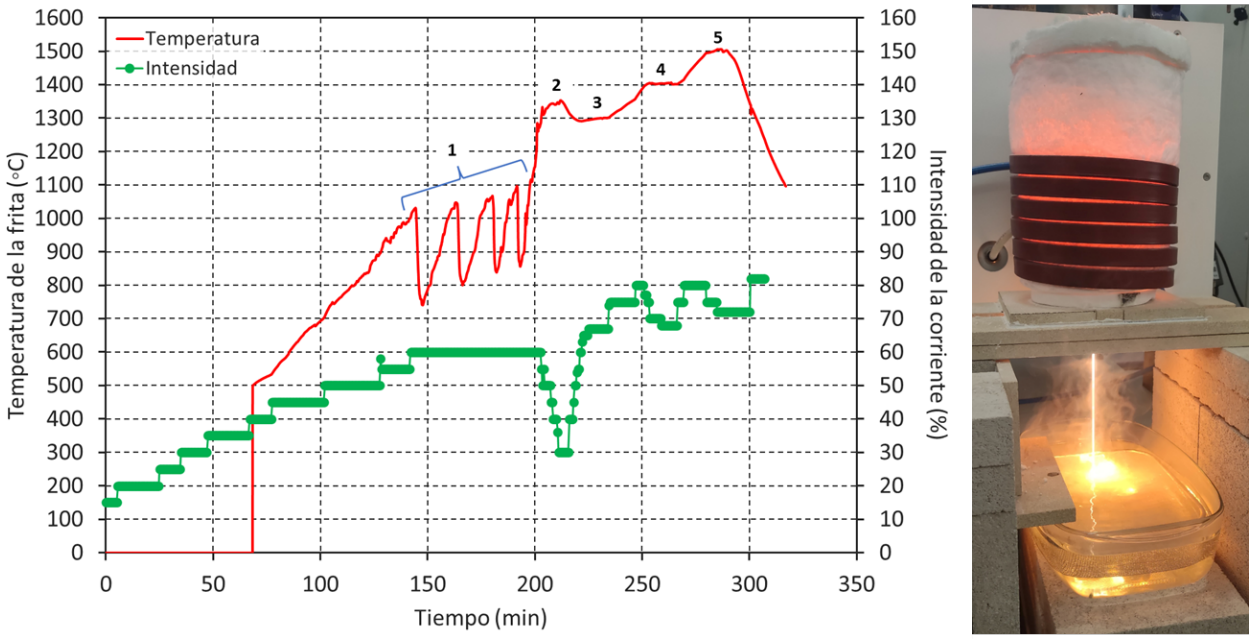

Figura 8. *Ensayo de fusión y fritado en continuo de la frita A.*

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Del presente estudio pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- La descarbonización de las industrias intensivas en el uso de energía es fundamental para alcanzar el propósito del Pacto Verde Europeo. La electrificación de los procesos térmicos puede desempeñar un papel crucial en la consecución de este objetivo.
- Se ha logrado fundir con éxito tres composiciones distintas de frita mediante la técnica de inducción electromagnética en combinación con iniciadores de la fusión. Sin embargo, al retirar los iniciadores, solo una de las tres composiciones pudo mantenerse caliente mediante la inducción.
- Se observa una relación directa entre la resistividad eléctrica de la muestra a calentar y su capacidad para retener y captar calor por sí misma una vez que se encuentra en estado líquido.
- La resistividad eléctrica es un parámetro que varía en función de la temperatura y de la composición química del material fundido.

Las conclusiones apuntan a que la inducción electromagnética podría considerarse una técnica prometedora para la fusión directa de fritas cerámicas. Sin embargo, los ensayos preliminares indican que su viabilidad depende críticamente de la composición química de cada muestra, que determina su resistividad eléctrica a las temperaturas de fusión. Para determinar los límites y las posibilidades reales de esta tecnología, será necesario llevar a cabo investigaciones adicionales.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo quieren agradecer a la Generalitat Valenciana el apoyo económico brindado para poder llevar a cabo esta investigación a través del proyecto DEMOELECTRICS - Demostradores de electrificación de calor, financiado por el Instituto Valenciano de Competitividad Empresarial (IVACE).

7. BIBLIOGRAFÍA

[1] Draft 1 of the Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Ceramic Manufacturing Industry (CER BREF), European Commission, 2023, JRC134517.
[2] https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/ceramic-manufacturing-industry
[3] Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass (GLS BREF), European Commission, 2013, JRC78091.
[4] https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/es/reference/manufacture-glass-0
[5] Guía de Mejores Técnicas Disponibles en España del Sector de la Fabricación del Vidrio. Ministerio de Medio Ambiente, 2007, I.S.B.N.: 978-84-8320-389-7.
[6] Richard E. Haimbaugh, Induction Heat Treating 2nd edition, ASM International, Ohio, 2015, ISBN-13: 978-1-62708-089-7.
[7] Saito, K., Okumura, T., & Yamamoto, K. (2015, October). Large Scale cold crucible levitation melting furnace for titanium. In 8th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials.
[8] Yu.S. Kuz'minov, E.E. Lomonova and V.V. Osiko, Cambridge International Science Publishing Ltd, Cambridge, 2003, ISBN 978-1-904602-01-9.
[9] Susan L. Schiefelbein, A new technique to measure the electrical properties of molten oxides, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 1996.
[10] F. Soleimani et al., Electrical Resistivity Measurement of the Molten Cordierite Glass Using Two wire Method, Advanced Ceramics Progress, ACERP: Vol. 2, No. 1, (Winter 2016) 1-4.
[11] Yusuke Harada et al., Impedance Measurements and Equivalent Circuit Analysis of Binary Alkali Silicate Melts, Department of Materials Science and Engineering, Kyushu University, Japan, 2018, ISIJ International, Vol. 59 (2019), No. 3, pp. 421-426.
[12] G. J. Janz and R. P. T. Tomkins, Conductance Cell Calibrations, 1977 J. Electrochem. Soc. 124 55C.
[13] Yusuke Harada et al., Structural Evaluation of Silicate Melts by Performing Impedance Measurements and Quasichemical Model Calculations, METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS, 968—VOLUME 52B, APRIL 2021.