



**Universidad
Zaragoza**

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Diseño y Optimización de un Horno de Pan
Industrial para mejorar la eficiencia y la calidad del
producto.

Design and Optimization of a Baking Bread Oven to
improve efficiency and product quality.

Autor

Carlos Alonso Pueyo

Director

Hippolyte Amaveda Metonou

Titulación

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Escuela de Ingeniería y Arquitectura de Zaragoza

2023/2024



RESUMEN

El presente proyecto de fin de grado se inspira en un horno ‘pocket’ instalado en la panadería de los padres del autor. Este horno, utilizado a diario en la producción de productos de panadería y repostería, sirve como base para la reconstrucción de un horno con características similares, pero con un enfoque en la reducción de costes sin comprometer su funcionamiento ni la calidad de los productos que se elaboran en él. La idea principal es abaratar los costes de fabricación, ya que estos dispositivos, esenciales para cualquier panadero, suelen tener precios muy elevados y no todos los profesionales del sector pueden permitírselos.

Para afrontar este reto, el autor se adentra en un proceso exhaustivo de investigación y selección de los materiales más adecuados para cada una de las partes de un horno de pan. Este proceso se realiza de acuerdo con los criterios de selección de materiales establecidos por Ashby, un método reconocido en la ingeniería de materiales que permite evaluar las propiedades y el coste de diversos materiales para determinar cuáles son los más apropiados para una aplicación específica.

Es importante destacar que el horno es un elemento industrial muy complejo, compuesto por numerosas partes que deben funcionar de manera coordinada para asegurar un rendimiento óptimo. En este proyecto, se ha decidido simplificar la construcción del horno, enfocándose en su estructura básica como si se tratara de una caja, y dejando de lado componentes electrónicos, motores y otros elementos de diseño sofisticado. El objetivo es reemplazar los materiales actuales por otros más económicos, manteniendo la funcionalidad y la eficiencia del horno.

Además, el proyecto busca implementar el acceso a estos hornos, facilitando que las panaderías pequeñas puedan adquirirlos y competir en igualdad de condiciones con establecimientos más grandes. Al reducir los costes de producción, se espera que estos hornos sean más accesibles para todos, permitiendo que más panaderos puedan elaborar productos artesanales de alta calidad. Este enfoque no solo tiene implicaciones económicas, sino que también puede contribuir a la sostenibilidad de las pequeñas empresas y al fomento de la producción artesanal en la comunidad.

ABSTRACT

This final degree project is inspired by a 'pocket' oven installed in the bakery run by the author's parents. This oven, used daily in the production of bakery and pastry products, serves as the basis for reconstructing an oven with similar characteristics, focusing on cost reduction without compromising its functionality or the quality of the products made in it. The main idea is to reduce manufacturing costs, as these essential devices for any baker tend to be very expensive, and not all professionals in the sector can afford them.

To tackle this challenge, the author delves into an exhaustive process of researching and selecting the most suitable materials for each part of a bread oven. This process is conducted according to the material selection criteria established by Ashby, a recognized method in materials engineering that allows evaluating the properties and cost of various materials to determine which are the most appropriate for a specific application.

It is important to highlight that the oven is a very complex industrial element, composed of numerous parts that must work together to ensure optimal performance. In this project, it has been decided to simplify the construction of the oven, focusing on its basic structure as if it were a box, leaving aside electronic components, motors, and other sophisticated design elements. The objective is to replace current materials with cheaper ones, maintaining the functionality and efficiency of the oven.

Additionally, the project seeks to introduce the access to these ovens, facilitating their acquisition by small bakeries and enabling them to compete on equal terms with larger establishments. By reducing production costs, it is hoped that these ovens will be more accessible to everyone, allowing more bakers to produce high-quality artisanal products. This approach has not only economic implications but can also contribute to the sustainability of small businesses and the promotion of artisanal production within the community.

TABLA DE CONTENIDOS

1.INTRODUCCIÓN	6
1.1 Antecedentes y contexto del proyecto.....	6
1.2 Objetivos y alcance.....	6
1.3 Metodología de trabajo.....	7
2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	9
2.1 ¿Qué es un horno de pan?	9
2.2 ¿Qué se tiene en cuenta para la selección de un material?.....	10
3.DISEÑO DEL HORNO DE PAN	11
3.1 Selección de materiales.....	11
3.1.1 parte delantera y campana exterior.....	13
3.1.2 Aislante.....	20
3.1.3 El cristal de la puerta del horno/Mampara.	24
3.1.4 Recubrimiento de la cámara de combustión y bancada	27
3.2 Creación de planchas para las paredes del horno.....	30
3.3 Cálculo de medidas físicas.....	33
3.3.1 Material alternativo al acero AISI 205 para reducir el peso de los componentes del horno.	34
4. PART COST ESTIMATOR	35
5. CONCLUSIONES	37
5.1 Resultados obtenidos	37
5.2 Valoración personal.....	38
6. BIBLIOGRAFÍA	39
7. ÍNDICES DE FIGURAS	41
8. ÍNDICE DE TABLAS.....	42
9.ÍNDICE DE ECUACIONES	42
10. ANEXOS	43

1.INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes y contexto del proyecto

El proceso de cocción del pan ha sido fundamental en la historia de la humanidad, y la tecnología de los hornos ha evolucionado a lo largo del tiempo para satisfacer las demandas cambiantes de la producción y la calidad del pan. En la actualidad, la eficiencia energética y la sostenibilidad son aspectos cruciales en cualquier proceso industrial, y los hornos de pan no son una excepción. La búsqueda de métodos más eficientes y sostenibles en la producción de pan se ha convertido en una prioridad para la industria alimentaria.

El horno es uno de los principales equipos para la cocción de alimentos que usa un complejo proceso de transferencia de masa y calor.

Dependiendo del tipo de energía consumida se pueden clasificar en dos grupos. Hornos de combustible, mayormente gasoil, y hornos eléctricos.

El calentamiento por resistencia eléctrica presenta varias ventajas frente a sistemas basados en la combustión. Como mayor control de precisión y velocidad de calentamiento.

Un horno, es una cámara aislada térmicamente fabricada con materiales refractarios y termoaislantes con un exterior metálico, usada para calentar, hornear, cocer o secar algunas sustancias alimenticias. Hornear es una técnica de procesamiento que tiene un papel fundamental para la calidad final de los productos. Pan, galletas, tartas, bizcochos, etc.

El presente Trabajo de Fin de Grado se sumerge en el desafiante pero vital campo de la optimización de materiales con el objetivo principal de reducir los costes de producción, impulsando así la eficiencia económica de las empresas. Además, se hace un especial énfasis en el impacto medioambiental de dichos procesos, buscando no solo la reducción de costes, sino también la implementación de prácticas sostenibles que contribuyan a la protección del medio ambiente y la reducción de la huella ecológica.

1.2 Objetivos y alcance

El **principal objetivo** del presente trabajo es una búsqueda de soluciones que permitan abaratar los costes de fabricación sin comprometer la integridad estructural o funcionalidad de los productos. En este estudio, se explorará diversas estrategias de optimización de materiales, considerando aspectos como la selección adecuada de materias primas, la mejora de procesos de fabricación y la aplicación de tecnologías innovadoras.

Estas medidas no solo buscan reducir los costes directos asociados a los materiales, sino también minimizar los residuos y maximizar la eficiencia energética en la cadena de producción.

El trabajo está inspirado en un horno rotatorio (Horno Pocket). Un horno instalado en una panadería generacional donde el paso de los años ha obligado a modernizar los procesos de fabricación, pero conservando el sabor especial de la tradición.

Además, debido a la escasa información proporcionada por las empresas acerca de los materiales de construcción, se investigará sobre los materiales más comunes usados en hornos de la industria alimentaria especificando todas las características del material considerado.

Para llevar a cabo el desarrollo de este trabajo con enfoque teórico se empleará la base de datos GRANTA CES EduPack que permitirá manejar todos los materiales y conocer todas sus características. CES EduPack constituye una herramienta integral para respaldar el aprendizaje en el campo de la Ciencia de los Materiales, aplicable en diversas áreas como ingeniería, ciencias, procesos y diseño, entre otros (Púertolas et al., 2016). Este software de selección de materiales permite acceder a una extensa base de datos, facilitando la identificación del material o proceso más adecuado para satisfacer exigencias y condiciones específicas.

1.3 Metodología de trabajo

Para conocer la metodología seguida a lo largo de este trabajo, se va a resumir cada uno de los pasos a seguir para conseguir la máxima optimización posible de los materiales de fabricación o en su defecto argumentar porque se debería continuar con los materiales que actualmente se fabrican los hornos de pan. Para ello se seguirá un estricto proceso de selección.

La selección del material para una aplicación específica es una etapa crucial en el diseño de cualquier pieza, componente o equipo, ya sea para propósitos estructurales o funcionales. Los ingenieros tienen a su disposición una amplia gama de materiales para elegir. Una elección acertada garantiza un funcionamiento óptimo y reduce significativamente la probabilidad de fallos prematuros. Es esencial comprender los distintos materiales, sus estructuras y propiedades, así como el impacto de los procesos de fabricación y las condiciones operativas en estas características. Esto afecta directamente el rendimiento del componente.

-Análisis de los posibles materiales de construcción

Gracias a la herramienta GRANTA CES EduPack se reduce el rango de selección dependiendo de las especificaciones deseadas en las diferentes partes del horno. Una vez acotado, se hará un gráfico de Ashby que permite comparar diferentes propiedades mediante índices de rendimiento, que son una relación de parámetros de material que hay que optimizar para maximizar el rendimiento de un componente, basándose en la función específica, la restricción limitante y el objetivo del diseño.

La principal propiedad será el precio que interesará minimizarlo. Se encontrará siempre en el eje de abscisas, la propiedad en las ordenadas dependerá de la característica necesaria que debe tener el material para cumplir las condiciones de trabajo impuestas. Para poder acotar más la búsqueda de un material, se trazan rectas de índice que dan valores de índices de optimización distintos. Dependiendo de si se quiere minimizar o maximizar, se traslada la recta de arriba a abajo para facilitar la tarea de selección. Es importante destacar que la principal intención de este trabajo es reducir los costes de fabricación. Un factor crucial para considerar es el peso, ya que el horno será montado por personas y, en ocasiones, no se puede utilizar maquinaria para su instalación. Por esta razón, en algunas situaciones, un material más liviano, aunque más caro, puede ser la solución ideal para evitar problemas de salud en los técnicos.

- Requerimientos principales de un horno de pan

Un horno debe ser capaz de soportar temperaturas de hasta 300 °C. Es fundamental seleccionar materiales que resistan temperaturas superiores a las de trabajo para garantizar un margen de seguridad adecuado. Esto no solo asegura un rendimiento óptimo, sino también

una mayor durabilidad del horno bajo condiciones extremas.

Los materiales empleados en la fabricación del horno deben ser inocuos para la salud, ya que estarán en contacto directo con los alimentos. Esto implica que no deben liberar sustancias tóxicas ni contaminar los alimentos de ninguna manera. Es crucial cumplir con las normativas y estándares de seguridad alimentaria vigentes para evitar riesgos a los consumidores.

La resistencia a la corrosión es otra propiedad esencial, dado que los componentes del horno estarán expuestos constantemente al vapor de agua y otros agentes corrosivos. Los materiales resistentes a la corrosión garantizan una vida útil más prolongada y reducen la necesidad de mantenimiento y reemplazo de piezas, lo que a su vez contribuye a la eficiencia y economía del equipo.

Además, algunos materiales deben ser soldables. La capacidad de soldadura es vital para asegurar que los componentes puedan unirse de manera firme y segura, manteniendo la integridad estructural del horno.

-Comparación de precios y propiedades de los materiales seleccionados

Después de haber seleccionado los materiales óptimos, el siguiente paso es elaborar una tabla detallada que permita comparar numéricamente las propiedades de cada material, centrándose especialmente en el precio. Esta tabla facilitará una selección más precisa y fundamentada. Cada material se evaluará en términos de su estabilidad térmica, resistencia al choque térmico, capacidad de inspección visual, reciclabilidad y cualquier otra propiedad relevante para el proyecto. Al organizar esta información de manera clara y estructurada, se brindará una visión completa de las características de cada material, lo que ayudará a tomar la decisión más adecuada para el proyecto.

-Herramienta Part Cost Estimator (Estimación de costes de fabricación)

Para llevar a cabo esta sección, se emplea la herramienta Synthesizer, que ofrece una amplia variedad de opciones para crear nuevos materiales a partir de los ya existentes. Específicamente, se utiliza la función "Part Cost Estimator", permitiendo calcular el coste de la pieza durante la etapa inicial del diseño conceptual. En esta etapa, se están considerando varios materiales y aún no se han definido los detalles específicos del diseño.

La función "Part Cost Estimator" tiene en cuenta varios factores, incluyendo el material seleccionado, procesos de conformación, el tamaño y la complejidad de la pieza, así como el formato estándar y personalizado. Además, también considera opciones para el reciclaje de residuos de fabricación, lo que contribuye a una evaluación más completa del coste total de la pieza.

Al utilizar esta herramienta, los diseñadores pueden obtener estimaciones precisas del coste de la pieza en las primeras etapas del proceso de diseño, lo que les permite tomar decisiones informadas sobre qué materiales y procesos utilizar para optimizar tanto el rendimiento como la eficiencia económica del producto final.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

2.1 ¿Qué es un horno de pan?

Antes de entrar en detalle con el tema principal del Trabajo Fin de Grado, es importante poner un contexto al proyecto que se está llevando a cabo y conocer el funcionamiento de un horno de pan, la tecnología que se va a usar y los materiales con los que se construyen actualmente los hornos de pan. Todo ello contribuirá a tener una visión global del proyecto más completa, y por lo tanto a entender mejor las decisiones tomadas a lo largo del mismo.

El funcionamiento del horno 'pocket' analizado se basa en la convección en el cual el producto a cocer es rozado por un flujo de aire calentado por un generador de calor de tipo combustión o bien eléctrico y puesto en circulación por un electroventilador.

El flujo de aire caliente es introducido en la cámara de cocción a través de unas aberturas verticales equipadas de registros de regulación que permiten una mejor distribución del aire y por consiguiente una buena uniformidad de cocción.

El producto es colocado sobre bandejas que se introducen en el carrito provisto de ruedas para permitir su movimiento.

El carrito una vez introducido en la cámara de cocción, es puesto en rotación por un grupo mecánico al efecto, colocado en la parte superior del horno.

La rotación del carrito garantiza la uniformidad de la cocción.

“En la cámara de cocción, moléculas de aire, vapor de agua, o los gases de combustión circulan a través del horno y transfieren el calor por convección hasta que entran en contacto con la superficie sólida” (Ing. POLIN & C. S.p.A., 2002). Entonces se transfiere calor por conducción. La energía radiante de las llamas de combustión y todas las partes metálicas del horno viajan directamente a través del espacio. Es posible que parte de esta energía nunca llegue al producto debido a que es interceptada por algunas sustancias no transparentes a la radiación. Normalmente, la conducción y la radiación tienden a causar diferenciales de temperatura localizados. La conducción aumenta la temperatura de las bases del producto, mientras que la radiación aumenta la temperatura de las superficies expuestas. La radiación también puede calentar las latas metálicas que, a su vez, calientan por conducción las superficies inferiores y laterales del producto. La convección tiende a igualar los gradientes de temperatura. La proporción de cada método varía en los distintos hornos, lo que se traduce en la variación de los productos de los distintos hornos.

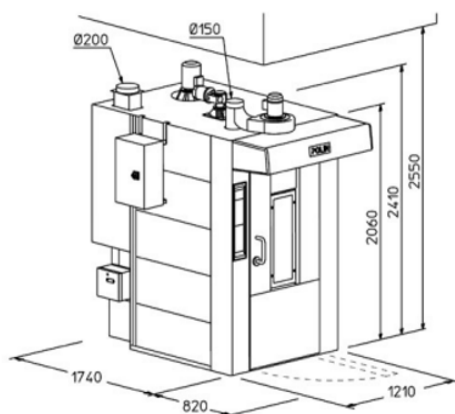


Figura 1: Esquema de un horno pocket

2.2 ¿Qué se tiene en cuenta para la selección de un material?

“La selección de materiales para una aplicación industrial es el proceso de identificar y elegir los materiales más adecuados para cumplir con los requisitos específicos de una aplicación particular en un entorno industrial” (Ashby, 2005). Este proceso implica una evaluación exhaustiva de las propiedades de los materiales, así como de las condiciones operativas y los requerimientos del producto final.

La elección del material se hace en la etapa de diseño conceptual, donde se identifica la categoría de posibles materiales (metales, cerámicos, polímeros, compuestos). En este punto, los criterios fundamentales son los requisitos de temperatura y corrosión.

En la etapa de diseño de formulación se examina qué tipo de material específico se debe usar según requisitos técnicos. La elaboración del diseño se realiza con la tabla de propiedades publicada en manuales o en la base de datos GRANTA CES EduPack.

En la etapa final, de diseño en detalle, el diseño final real se realiza ya con el material final real, con las propiedades que aporta el proveedor. Se aconseja solicitar datos estadísticos que identifiquen el intervalo de variación de propiedades.

A lo largo de estas tres etapas intervienen una serie de factores importantes y determinantes que deben ser considerados cuidadosamente para asegurar el éxito del proceso en su totalidad. Algunos de estos factores son factores físicos, factores mecánicos, procesamiento y factores de duración de componentes.

Insensibles a la microestructura	Sensibles a la microestructura
Densidad, ρ	Resistencia, σ
Módulo de elasticidad, E	Ductilidad
Conductividad térmica, κ	Tenacidad a la fractura, K_{Ic}
Coefficiente de expansión térmica lineal, α	Fatiga y propiedades cíclicas; fatiga por corrosión
Punto de fusión, T_f	Termofluencia
Temperatura de transición vítrea, T_g , para polímeros	Impacto
Corrosión uniforme, mm/año o gmd	Dureza
Costo, \$ (dólares de EE.UU.) por masa	

Tabla 1: Propiedades más usadas en el diseño de un componente

Como expresa Ashby (2005), hay dos criterios finales para tener en cuenta, el primero es el coste, es difícil de estimar, pero el más común es el coste de manufactura de un componente estándar, este coste se modifica por una serie de multiplicadores tales como forma, tamaño, complejidad, precisión, etc.

El segundo criterio más importante es el criterio medioambiental, no suele ser prioritario, pero al tratarse de un proyecto ingenieril es una característica muy importante, para evaluar los factores medioambientales se analiza el ciclo de vida de un producto teniendo en cuenta la energía total asociada.

3.DISEÑO DEL HORNO DE PAN

3.1 Selección de materiales

Para comenzar, es fundamental analizar las principales partes del horno, lo que incluye la cubierta exterior, el interior, el cristal y el aislamiento. Cada una de estas partes desempeña un papel crucial en el funcionamiento y la eficiencia del horno, y, por lo tanto, es necesario evaluarlas detenidamente para garantizar un diseño óptimo y una selección adecuada de materiales.

Durante la selección de cada uno de los materiales del horno es importante entender cómo se trazan las líneas de pendiente en los diagramas de Ashby, y que pendiente usar para maximizar o minimizar el índice de rendimiento. Para ello se propone un ejemplo práctico que sintetiza el proceso de obtención de la pendiente.

$$M = \frac{E^{1/2}}{\rho}$$

$$E^{1/2} = \rho M \rightarrow \frac{1}{2} \log E = \log \rho + \log M \rightarrow \log E = 2 \log \rho + 2 \log M$$

$2 \log M$ = Coordenada en el origen.

$2 \log \rho$ = El 2 es la pendiente

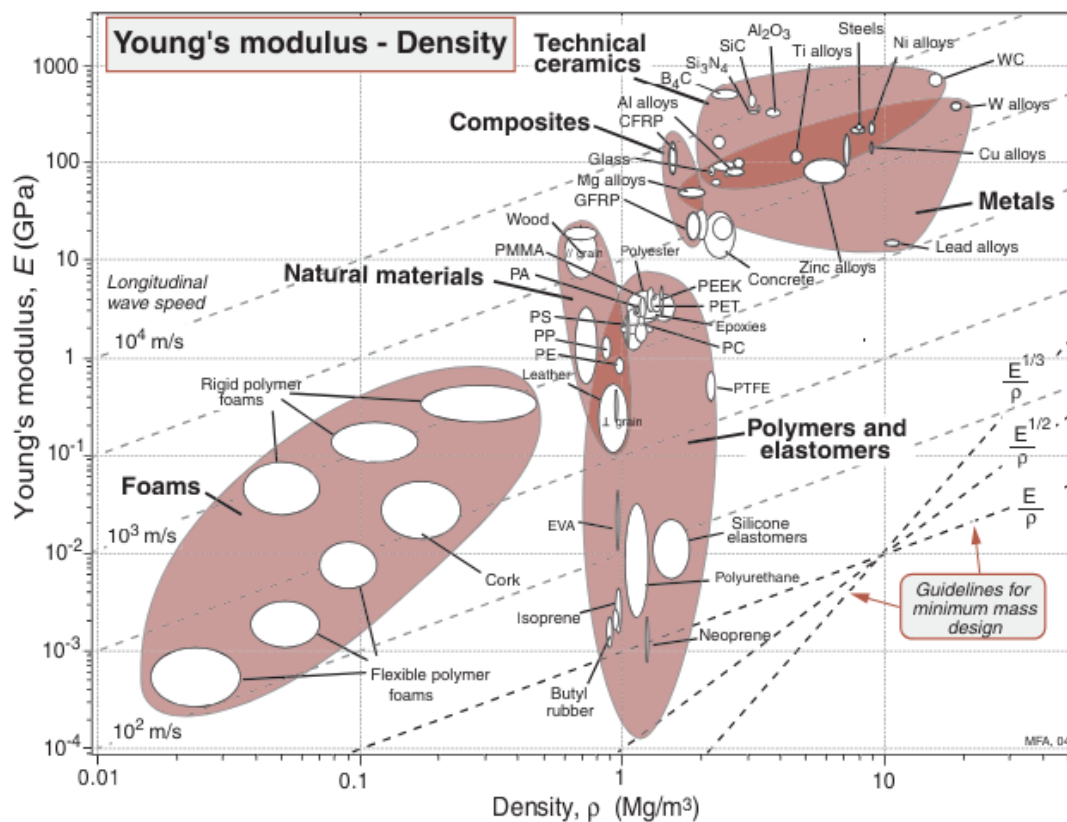


Figura 2: Ejemplo de distintas líneas de índice con diferentes pendientes

En la figura se representa el módulo de Young frente a la densidad, aparecen varias burbujas de familias de materiales como espumas, polímeros, materiales naturales, metales, compuestos y cerámicas técnicas. En esta gráfica, se representan tres tipos de índices con diferentes pendientes que servirán de guías para maximizar o minimizar el índice del material y así poder elegir el material óptimo.

Parte delantera y Campana exterior

La parte delantera en acero inoxidable con puerta de espesor adecuado de aislante interpuesto para limitar la temperatura de las superficies exteriores dentro de valores establecidos por las normas y provisto de vidrio doble para garantizar también una menor dispersión de calor hacia el exterior. También el asidero exterior está aislado térmicamente para mantener la temperatura a niveles normales.

Las planchas interiores

La parte interna está en contacto con la materia. Se compone de chapas de acero inoxidable o acero cincado, aptas para contener el aislamiento necesario. Tiene que ser capaz de aguantar hasta 300 Cº. Es crucial seleccionar un material para el interior que tenga una alta resistencia térmica para soportar las temperaturas elevadas y que sea fácil de limpiar para mantener los estándares de higiene.

Se pretende crear un material multicapa que este compuesto del mismo acero tanto en la parte interior como la exterior y en medio de estas el material aislante para que la logística y el montado sean más fáciles.

El aislamiento

Es el responsable de minimizar las pérdidas de calor y mantener el horno a la temperatura deseada. Debe conservar la temperatura exterior dentro de los límites establecidos por las normas. Puede ser de fibra de vidrio, láminas de amianto (hornos viejos) y goma de silicona o fibra de lana.

Recubrimiento de la cámara de combustión

La cámara de combustión es una de las partes más importantes de un horno industrial y tiene que soportar temperaturas muy elevadas además de ser impermeable a los gases calientes de alta presión que se encuentran en la parte superior de la zona de trabajo. Por ello, los materiales empleados para la fabricación de una cámara de combustión deben resistir los ataques de humo de óxido ferroso, la radiación y el choque térmico. Existen de diferentes tipos: planas, de arco, semicirculares y suspendidas. La cámara de combustión se fabrica con aceros de altos calibres y están aisladas con materiales cerámicos.

Bancada

La bancada de un horno es la base o estructura sobre la cual se apoya el horno. Esta estructura proporciona soporte y estabilidad al horno, asegurando que esté nivelado y seguro durante su operación. En algunos casos, la bancada puede incluir elementos adicionales como aislantes térmicos, materiales refractarios, y sistemas de ventilación o refrigeración, dependiendo del tipo de horno y su aplicación. La bancada es esencial para el funcionamiento seguro y eficiente del horno.

3.1.1 Parte delantera y campana exterior

Se comienza con el exterior del horno, se usa como referencia el acero inoxidable, en concreto la calidad 304 que es el AI de uso más extendido. Como expresa Mangonon (2001), los aceros inoxidables se caracterizan por la adición de 10.5% en peso de Cr al hierro como mínimo. En la mayoría de los aceros inoxidables, el contenido máximo de cromo es de alrededor de 30% y el contenido mínimo de hierro es de 50%. Normalmente, el carbono está presente en proporción de 0.03 % hasta un máximo de 1.2 % en ciertas calidades martensíticas.

Los criterios usados para la selección de este componente son:

Buena procesabilidad: esto se traduce en buena soldabilidad y maquinabilidad, así como capacidad de fabricarse por laminación para obtener las chapas del grosor adecuado, las cuales se soldarían entre sí. También debemos tener en cuenta el tiempo de servicio al que va a estar sometido el material, aproximadamente intervalos de 20-30 min.

En *GRANTA CES EduPack*, se usa la herramienta *tree* para seleccionar los procesos de unión que deben poder aplicarse al material seleccionado, los cuales serán los más comunes en la industria, tungsten inert gas (TIG) y Metal Inert Gas (MIG), además de un proceso de laminado para dar forma al metal (*Hot Shape Rolling*).

Enlace de registro	Registros incluidos
 ProcessUniverse: \ Shaping \ Deformation \ Forging / rolling \ Hot shape rolling	1478 Mostrar
 ProcessUniverse: \ Joining \ Thermal welding \ Metals \ High temperature \ Gas metal arc (MIG) \ Gas metal arc (MIG)	1057 Mostrar
 ProcessUniverse: \ Joining \ Thermal welding \ Metals \ High temperature \ Gas tungsten arc (TIG) \ Gas tungsten arc (TIG)	1346 Mostrar

Figura 3:Procesos de forma y unión parte exterior e interior

Una vez seleccionado esto, pasamos a los límites de selección:

- Temperatura máxima de servicio: Para que el pan se cocine la temperatura de trabajo ronda los 250-300°C con zonas donde puede haber picos, aunque esta temperatura se da en el interior. Entre la plancha exterior e interior, se va a usar un material aislante, es necesario que el metal exterior también sea capaz de soportar dicha temperatura, por si hubiera problemas durante la vida en servicio.
- Procesabilidad: Esta etapa puede parecer redundante pero solo se está teniendo en cuenta su procesabilidad para cualquier tipo de proceso, mientras que en la etapa anterior se ha afinado a tres procesos específicos, aun así, es un límite necesario, aunque no suficiente.
- Resistencia a la corrosión de agua (H₂O): El horno funciona mediante la circulación de vapor a alta temperatura, evidentemente esto es una atmosfera altamente dañina, y aunque el metal exterior no está en contacto directo con dicha atmosfera, no tener en cuenta esta etapa podría acarrear problemas en el producto durante su vida en servicio.

Constantes

Atributo:	Constantes
Maximum service temperature (°C)	≤ 300
Y Metal hot forming	Acceptable, Excellent
Y Weldability	Excellent
Y Water (fresh)	Excellent
Y Flammability	Non-flammable

Tabla 2 Límites de selección del material exterior

Cuando se evalúan los materiales para su aplicación en el horno, es crucial considerar diferentes índices de rendimiento en relación con el coste, ya que este último es un factor crítico para la selección final. Al utilizar distintos índices de rendimiento, se garantiza una elección más completa y fundamentada. Algunos de los índices que podrían ser útiles para optimizar incluyen:

- Coste por unidad de transferencia, *thermal insulation, cycling heating*: este índice optimiza la capacidad de aislar el calor generado durante ciclos de calentamiento (Los horneados), por tanto, el resultado son materiales que no dejan pasar el calor generado, este índice volverá a aparecer para el material interior, y se usa en el exterior para aislar todavía más el calor, generando más eficiencia y menos pérdidas de calor al exterior.

Minimizar:

$$\left(\frac{\lambda}{(C_p \cdot \rho)} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot C_m \cdot \rho$$

Ecuación 1: Índice de rendimiento "coste por unidad de transferencia"

Donde:

λ = Conductividad térmica (W/m*K)

C_p = Capacidad de calor específica (J/kg.K)

ρ = Densidad (kg/m³)

C_m = Precio (currency/kg)

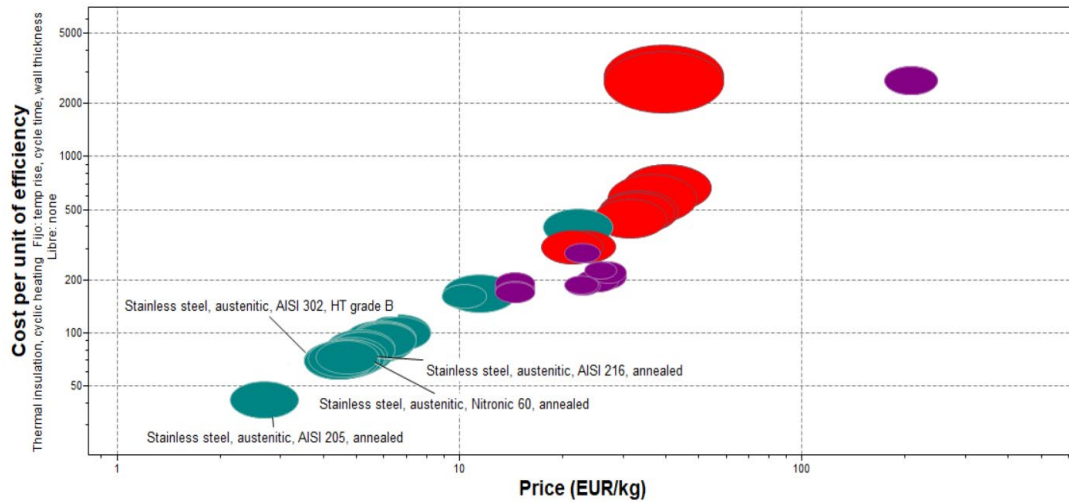


Figura 4: Gráfico coste por unidad de transferencia frente a precio

En la gráfica, se han seleccionado los cuatro aceros inoxidable que mejor se adaptan al índice mencionado. Para minimizar el precio y el coste por unidad de transferencia, se opta por los materiales más cercanos a la esquina inferior izquierda de la gráfica. Si se desea limitar aún más la búsqueda, se traza una línea de índice con una pendiente de dos (2). Esta línea se sitúa sobre el acero base seleccionado para trabajar, que en este caso es el AISI 304. De esta manera, se establece una referencia visual clara para identificar los materiales que cumplen con los criterios de selección y se facilita la toma de decisiones en cuanto a la elección del material adecuado para el proyecto.

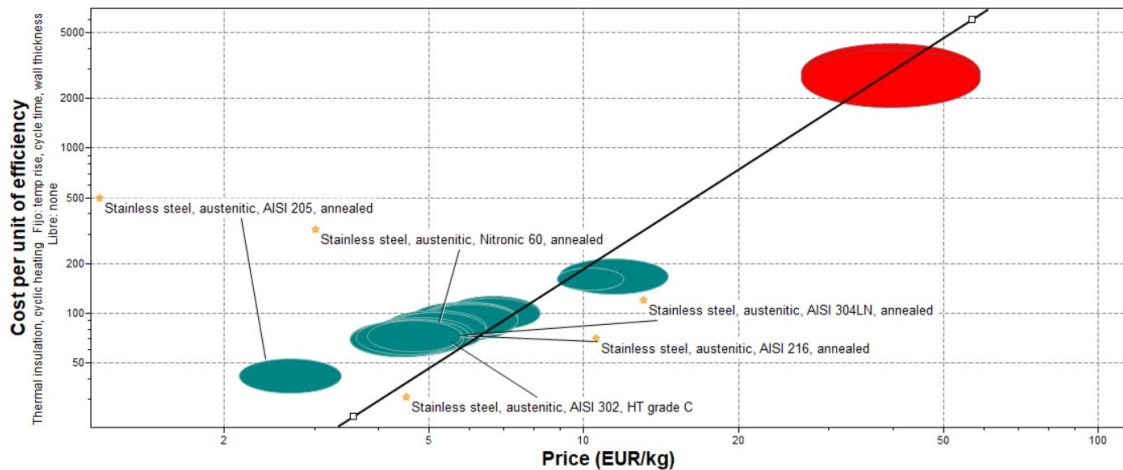


Figura 5: Coste por unidad de transferencia frente a precio con recta de índice de pendiente dos

Después de haber analizado detenidamente los materiales previamente seleccionados, se puede afirmar que son los más adecuados para las necesidades requeridas. La inclusión de la recta de índice permite realizar una comparación numérica entre estos materiales. A simple vista, se destaca el acero AISI 205 como la opción más económica entre todas las alternativas, además de ser el que más minimiza el coste por unidad de transferencia. Sin embargo, es importante considerar otros factores además del precio

al tomar una decisión final, como la resistencia, la durabilidad y la disponibilidad en el mercado, para garantizar una elección integral.

Los materiales seleccionados son los siguientes aceros inoxidable austeníticos:

1. Stainless steel, austenitic, AISI 205, recocido: destaca por su bajo precio y eficiencia en la transferencia de unidades.
 2. Stainless steel, austenitic, Nitronic 60, recocido: ofrece una combinación equilibrada de propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión.
 3. Stainless steel, austenitic, AISI 216, recocido: se distingue por su resistencia a la corrosión en ambientes agresivos.
 4. Stainless steel, austenitic, AISI 302, grado de temple C: presenta una excelente resistencia a la tracción y una buena resistencia a la corrosión.
- Estabilidad térmica: el índice establecido optimiza la conductividad térmica en relación con el coeficiente de expansión térmica. El objetivo principal es maximizar la estabilidad dimensional del material, lo que implica encontrar un equilibrio entre la capacidad del material para conducir el calor eficientemente y su capacidad para mantener sus dimensiones estables bajo cambios de temperatura.

Maximizar:

$$\frac{\lambda}{\alpha}$$

Ecuación 2: índice de rendimiento de estabilidad térmica

Donde:

λ = Conductividad térmica (W/m*K)

α = Coeficiente de expansión térmica (K^{-1})

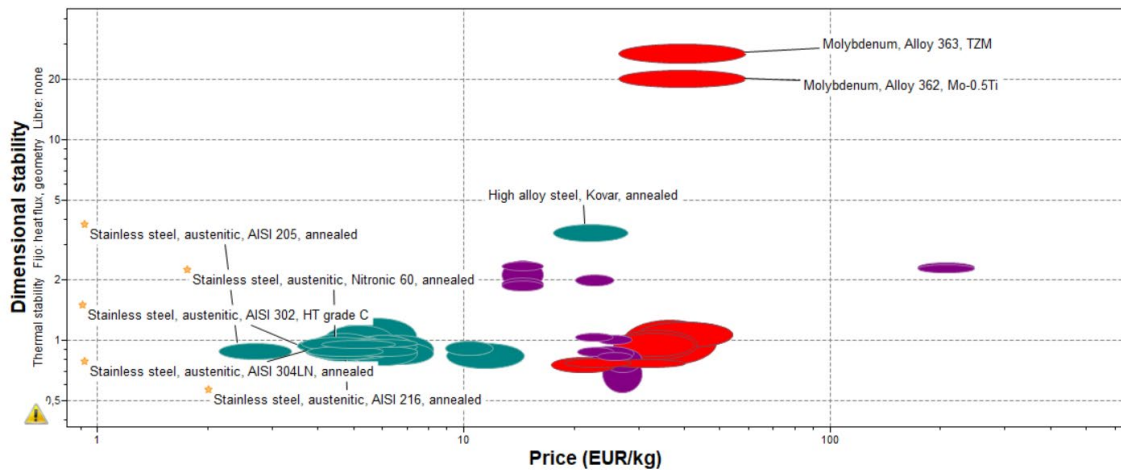


Figura 6: Gráfica estabilidad térmica frente al precio

Como se puede apreciar en la gráfica anterior, los materiales seleccionados inicialmente destacan por su bajo coste, pero no ofrecen la mejor estabilidad térmica requerida para la aplicación específica. A pesar de que las aleaciones de molibdeno 363 TZM, 362 Mo-0.5Ti exhiben la mayor estabilidad térmica, lamentablemente quedan descartados debido a su elevado precio. En consecuencia, se opta por mantener los mismos aceros inoxidable previamente seleccionados, los cuales cumplen con los requisitos de coste y, además, se considera la posibilidad de añadir otro material como el acero inoxidable austenítico AISI 304LN en estado de recocido.

Siguiendo el mismo procedimiento que con el índice anterior, se traza una recta de índice con una pendiente de uno (1) para acotar aún más la búsqueda y refinar la selección de materiales. Esta estrategia permite identificar con mayor precisión aquellos materiales que satisfacen de manera óptima los requisitos de estabilidad térmica y coste, garantizando así una selección adecuada para el proyecto en cuestión.

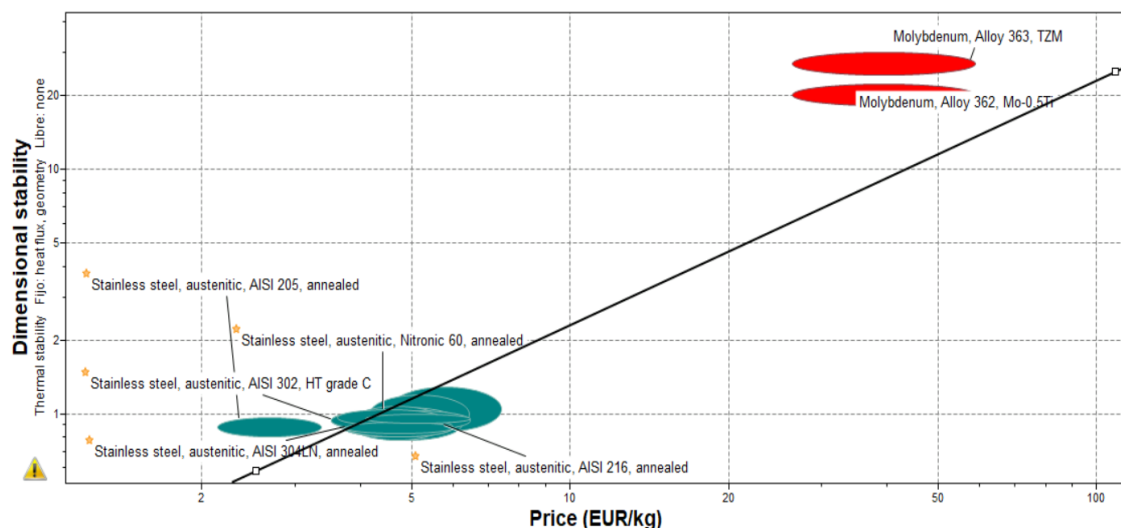


Figura 7: Estabilidad térmica frente al precio con recta de índice con pendiente uno

Después de limpiar la gráfica de los distintos materiales y realizar un análisis más detallado, se confirma que los materiales seleccionados anteriormente aún se encuentran dentro del rango deseado para este nuevo índice. Esto demuestra que los aceros inoxidable previamente

elegidos no solo cumplen con los requisitos de coste, sino que también satisfacen las necesidades de estabilidad térmica establecidas para el proyecto. La consistencia de estos materiales dentro del rango deseado, valida aún más su idoneidad para la aplicación en cuestión. Además, esta confirmación refuerza la decisión de mantener estos materiales en consideración para el proyecto, asegurando así una selección sólida y fundamentada en múltiples criterios.

- Resistencia al Choque térmico: compara el límite elástico frente a modulo elástico y coeficiente de expansión térmica, maximizándose para materiales capaces de soportar cambios de temperatura bruscos o continuados.

Maximizar:

$$\frac{\sigma_y}{E \cdot \alpha}$$

Ecuación 3: índice de rendimiento “choque térmico”

Donde:

σ_y = Límite elástico (MPa).

α = Coeficiente de expansión térmica (K^{-1}).

E = Módulo de Young (GPa).

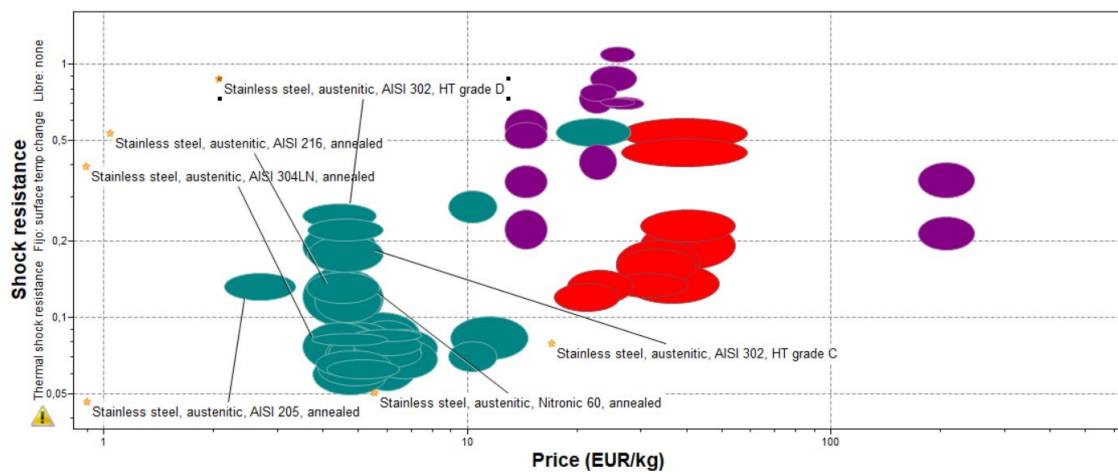


Figura 8: Gráfica choque térmico frente al precio

Comparando el choque térmico se acaba de corroborar que los 7 materiales seleccionados son los idóneos para la construcción del revestimiento del horno, así como el interior.

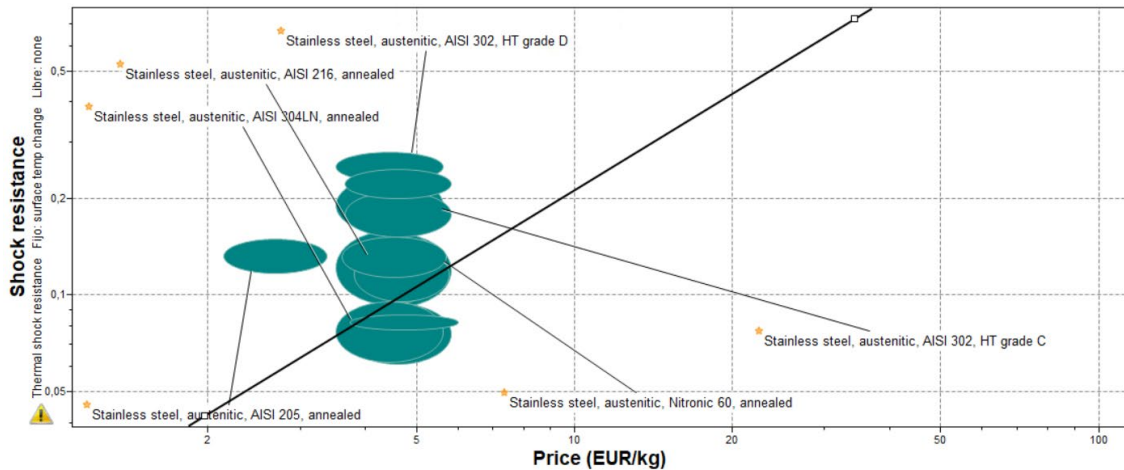


Figura 9: Gráfica choque térmico frente al precio con recta de pendiente uno

Acotando con la recta de pendiente uno (1), eliminamos los materiales más caros (aleaciones de molibdeno) de la familia. Se deja en claro que el horno estará construido de un acero inoxidable. Se acaba la selección del material exterior analizando todas las propiedades de los materiales seleccionados y estableceremos una comparación numérica.

Una vez realizados estos índices se compara el precio que es la principal prioridad para esta aplicación, así como las principales propiedades mencionadas anteriormente para el óptimo funcionamiento del horno.

	Stainless steel, austenitic, Nitronic 60, annealed	Stainless steel, austenitic, AISI 205, annealed	Stainless steel, austenitic, AISI 216, annealed	Stainless steel, austenitic, AISI 302, HT grade C	Stainless steel, austenitic, AISI 302, HT grade D	Stainless steel, austenitic, AISI 304LN, annealed
^ Propiedades calculadas						
Cost per unit of efficiency	57 - 89,8	33,4 - 52,6	59,3 - 90,2	55,2 - 88,2	55,8 - 89	57,5 - 92,1
Dimensional stability	0,904 - 1,03	0,814 - 0,96	0,79 - 1,08	0,864 - 1,02	0,864 - 1,02	0,84 - 0,927
Shock resistance	0,115 - 0,151	0,118 - 0,15	0,096 - 0,141	0,156 - 0,234	0,228 - 0,28	0,0782 - 0,0868
^ Price						
Price (EUR/kg)	3,61 - 5,67	2,14 - 3,36	3,8 - 5,75	3,52 - 5,59	3,52 - 5,59	3,74 - 5,98
^ Physical properties						
Density (kg/m ³)	7580 - 7660	7700 - 7900	7700 - 7900	7810 - 8010	7810 - 8010	7900 - 7910
^ Mechanical properties						
Young's modulus (GPa)	179 - 181	193 - 201	190 - 201	189 - 197	189 - 197	195 - 205
Yield strength (elastic limit) (MPa)	345 - 448	425 - 525	345 - 450	515 - 760	760 - 900	270 - 290
^ Thermal properties						
Maximum service temperature (°C)	816 - 982	755 - 787	755 - 787	750 - 925	750 - 925	750 - 925
Thermal conductivity (W/m.°C)	15,3 - 16,8	15 - 17	15 - 17	15 - 17	15 - 17	14,4 - 15,6
Specific heat capacity (J/kg.°C)	477 - 500	490 - 530	490 - 530	490 - 530	480 - 520	500
Thermal expansion coefficient (µstrain/°C)	15,8 - 17,4	17,1 - 19,1	15 - 20	16 - 18	16 - 18	16,5 - 17,5
^ Processing properties						
Metal hot forming	Acceptable	Acceptable	Acceptable	Acceptable	Acceptable	Acceptable
Weldability	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent
^ Durability						
Water (fresh)	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent
Flammability	Non-flammable	Non-flammable	Non-flammable	Non-flammable	Non-flammable	Non-flammable

Tabla 3: Comparación de los posibles materiales para la parte exterior del horno

Tras una observación detallada, se nota que la temperatura de servicio máxima para los candidatos supera el doble del límite requerido, lo que indica que estos materiales son capaces de soportar condiciones térmicas más extremas de las necesarias. Además, se destaca que el coeficiente de expansión térmica de estos candidatos se sitúa en valores similares, lo que sugiere una uniformidad en la respuesta ante cambios de temperatura. Al considerar el precio, se identifica que el **AISI 205** es el material más económico entre los seis candidatos. Esta información es crucial, ya que implica que el **AISI 205** ofrece una combinación favorable de propiedades térmicas y un coste accesible, lo que lo convierte en una opción atractiva desde el punto de vista económico, sin comprometer la calidad o el rendimiento del material.

Mangonon (2001), expresa que se trata de un acero con calidades austeníticas, en concreto de la serie 2XX, la cual contiene algo de nitrógeno hasta un 7% de níquel (Ni) y requiere de 5 a 20 % de Manganeso (Mn) para aumentar la solubilidad del nitrógeno en la austenita y prevenir la formación de martensita. El nitrógeno intersticial en solución aumenta la resistencia en la austenita.

3.1.2 Aislante

El material aislante tiene un importante papel en la construcción de hornos, pues se quiere conservar en el interior todo el calor generado para evitar altos consumos energéticos y poder cocer la materia prima con gran efectividad. Se busca que el tiempo que tarda la superficie interior en cambiar un grado sea lo mayor posible.

Uno de los productos más destacados en el mercado es la fibra cerámica, elaborada principalmente a partir de sílice y alúmina. Gracias a su composición, presenta altas resistencias mecánicas y una baja conductividad térmica, lo que permite un calentamiento y enfriamiento más rápido. Además, su capacidad para no retener calor, proporciona una respuesta óptima en diversas aplicaciones.

Se seleccionarán los siguientes límites para la elección del material:

- Temperatura máxima de servicio.
- Resistencia a la corrosión de H₂O
- Flamabilidad: Al estar sometido directamente a temperaturas altas de trabajo, es necesario que no exista ningún riesgo de incendio con el material, ya que incluso con la atmósfera rica en vapor de agua podría producirse un incendio.

Etapa	Atributo:	Constantes
1	Maximum service temperature (°C)	≥ 400
	Y Water (fresh)	Excellent
	Y Flammability	Non-flammable

Tabla 4: Límites de selección para el material aislante

Es importante destacar que se está buscando un material que presente forma de fibra, espuma o como panal de abeja, esto ayuda a minimizar el peso y por consiguiente una mejora en la logística y el montaje del horno. Por lo tanto, este requerimiento será un límite más impuesto en el programa para descartar materiales indeseados.

Con todos estos límites de selección, se acota a un total de 41 materiales, una cantidad reducida que permite analizar cada uno de los materiales.

Una vez seleccionados los límites, se procede a realizar los índices de optimización comparados a coste, al igual que en la selección del material exterior, esta vez el primer índice es la caída de temperatura en un determinado tiempo, *temperature drop intime t* (descenso de temperatura en el tiempo), ya que queremos que el interior de la cámara se mantenga caliente y dicho calor no se escape, por tanto, habrá que minimizar dicho índice.

Minimizar:

$$\frac{\lambda}{C_p \cdot \rho}$$

Ecuación 4: índice de rendimiento para la caída de la temperatura

Donde:

λ = Conductividad térmica (W/m*K).

C_p = Capacidad de calor específica (J/kg.K).

ρ = Densidad (kg/m3).

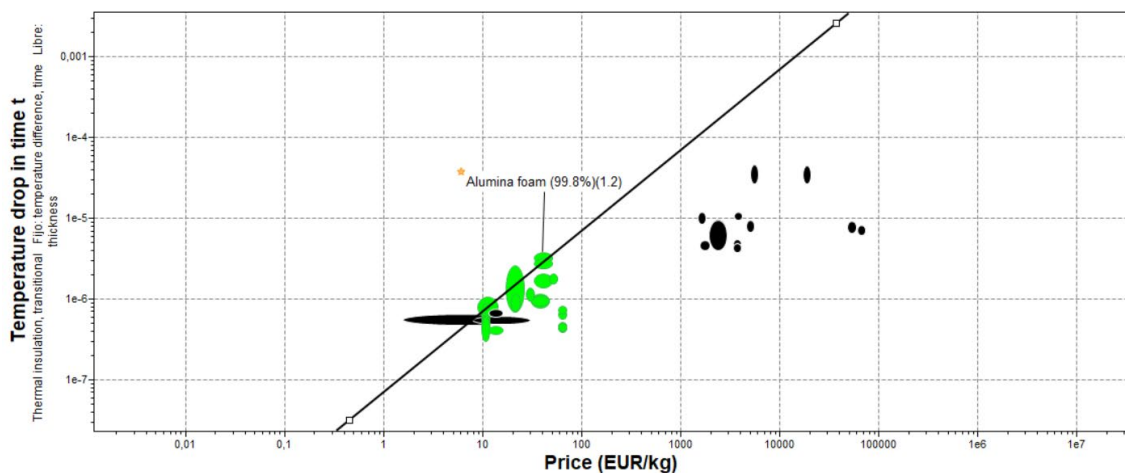


Figura 10: Gráfico caída temperatura frente al precio con recta de pendiente uno

Trazando una línea con pendiente uno (1), se observa que, para minimizar el índice, es preferible seleccionar un material que se encuentre por debajo o sobre dicha línea. Se puede notar que los materiales de la familia de fibras y partículas tienden a tener un precio elevado. Por lo tanto, se opta por seleccionar un material de la familia de espumas.

El material más óptimo es la espuma de alúmina, cuya conducta se comparará en las siguientes gráficas.

Estabilidad térmica:

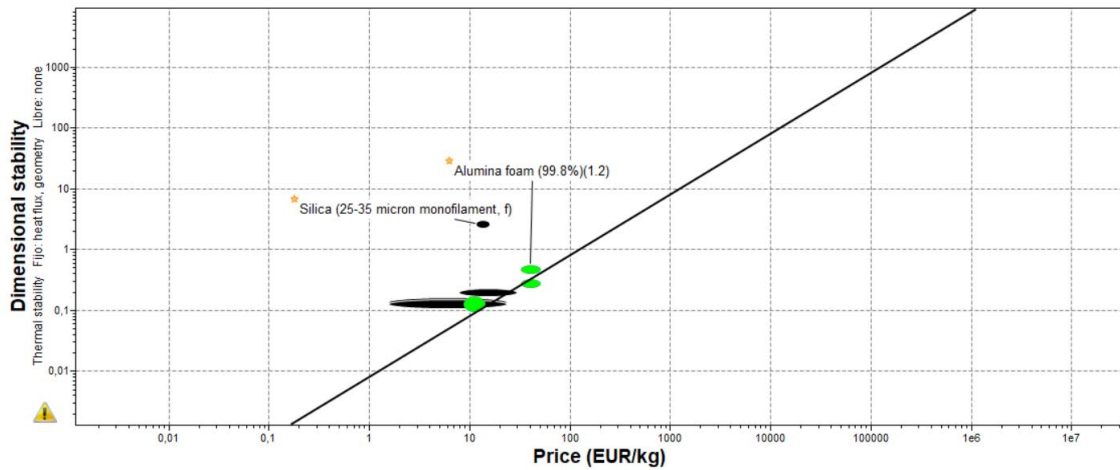


Figura 11: Estabilidad térmica frente a precio con recta de pendiente uno

En este caso, interesan los materiales que se encuentran por encima de la línea con pendiente uno. Se observan dos materiales que pueden ser candidatos para el aislante: la espuma de alúmina, mencionada en la gráfica anterior, y la sílice.

Resistencia al choque térmico:

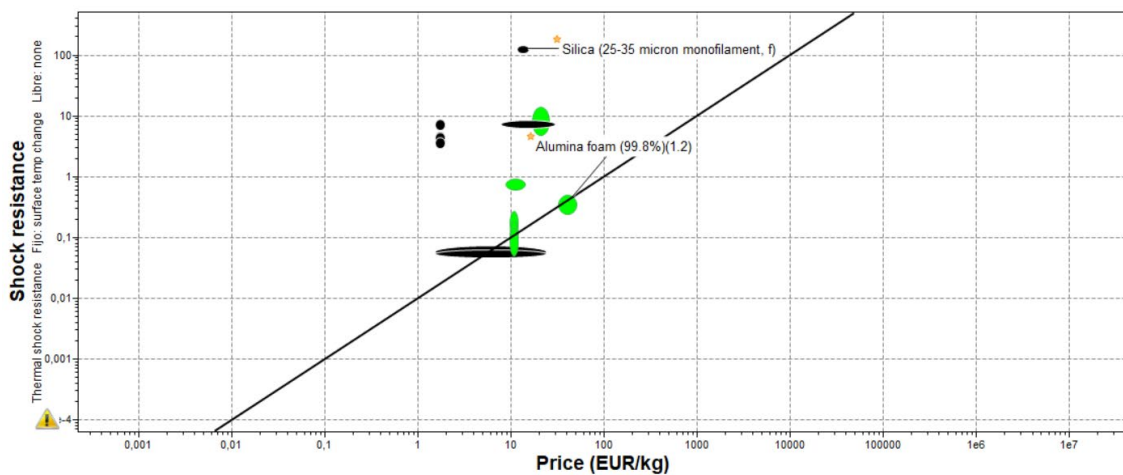


Figura 12: Gráfica de choque térmico frente a precio con recta de pendiente uno

En la presente gráfica, se busca maximizar el índice, por lo que todos los materiales por encima de la línea recta pueden ser considerados óptimos. Se observa que la sílice obtiene el índice máximo, mientras que la espuma de alúmina se encuentra en una posición intermedia en la gráfica, aunque sigue siendo un material muy válido.

	Alumina foam (99.8%) (1.2)	Silica (25-35 micron monofilament, f)
^ Propiedades calculadas		
Temperature drop in time t	0,00000285 - 0,00000375	6,63e-7 - 6,88e-7
Shock resistance	0,25 - 0,503	123 - 131
Dimensional stability	0,437 - 0,552	2,57 - 2,71
^ Composition overview		
Form	Foam	Fiber
Material family	Ceramic (technical)	Glass (technical)
Base material	Oxide	Oxide
^ Composition detail (metals, ceramics and glasses)		
Al ₂ O ₃ (alumina) (%)	99,8	0
SiO ₂ (silica) (%)	0	100
^ Price		
Price (EUR/kg)	32,8 - 49,4	11,6 - 15,5
Price per unit volume (EUR/m ³)	38500 - 60400	25300 - 33900
^ Physical properties		
Density (kg/m ³)	1180 - 1220	2180 - 2190
Relative density	0,297 - 0,328	
Porosity (closed) (%)	0	

Tabla 5: Comparación de la espuma de alúmina con la sílice

En resumen, la sílice presenta mejores propiedades en términos de rendimiento térmico y también tiene un precio más favorable en comparación con otros materiales evaluados. A primera vista, la intuición sugiere que la sílice sería la mejor opción para su uso como material aislante. Sin embargo, una investigación más detallada revela que la alúmina es frecuentemente utilizada como material aislante térmico en diversas aplicaciones industriales, debido a sus propiedades específicas y su eficacia en este rol.

La espuma de alúmina, aunque no alcanza el máximo índice en la gráfica y se encuentra en una posición intermedia, sigue siendo un material altamente válido y fiable. Su capacidad para actuar como aislante térmico ha sido probada en múltiples estudios y aplicaciones prácticas. En contraste, la sílice, a pesar de sus propiedades favorables en la gráfica, no se utiliza comúnmente para este propósito específico. Esto puede deberse a factores como su comportamiento en diferentes condiciones operativas, durabilidad a largo plazo, y otras características que no se reflejan completamente en la gráfica.

Por lo tanto, considerando los datos presentados como la experiencia práctica sobre materiales aislantes térmicos, la elección más adecuada es la espuma de alúmina. Este material no solo proporciona un rendimiento confiable y efectivo, sino que también cuenta con un historial de uso exitoso en aplicaciones donde el aislamiento térmico es crucial. Esta decisión asegura que se está optando por un material que cumple con los requisitos técnicos y prácticos necesarios para el proyecto en cuestión.

3.1.3 El cristal de la puerta del horno/Mampara.

Para la selección del cristal frontal en la puerta del horno que es un elemento estético y de inspección visual, se usa como referencia el material más común con el que se fabrican, el borosilicato, Pyrex®. Vidrios resistentes al choque térmico minimizando la aparición de fracturas por estrés térmico. “Siendo así uno de los materiales más utilizados tanto para hornos industriales de panadería como hornos para cocinas de uso común, el principal objetivo será reducir el coste y que sea térmicamente estable” (Marinelli, Mendez & Moran, 2016).

Se usa un límite de composición con el borosilicato como referencia, con porcentajes mínimos de alúmina de 1% y sílice de 70% con se tendrán materiales similares al borosilicato.

Una vez establecido los límites se usarán los siguientes índices de optimización, al igual que con los otros materiales, comparándolo frente al coste, los índices de optimización son:

- Estabilidad térmica.
- Resistencia al choque térmico.
- Transparencia.
- Reciclable.

Comenzamos preseleccionando en función de la composición, la temperatura de servicio máxima y la transparencia de nuestro material porque el cristal es un elemento visual que permite inspeccionar la materia prima sin necesidad de abrir la puerta del horno. Por supuesto que el material tiene que ser reciclable para ser sostenibles con el medio ambiente y colaborar en la reducción del impacto ambiental.

Etapas	Atributo:	Constantes
1	Al ₂ O ₃ (alúmina) (%)	1 a 27
	Y SiO ₂ (sílice) (%)	≥ 70
	Y Maximum service temperature (°C)	≥ 400
	Y Transparency	Transparent
	Y Recycle	✓

Tabla 6: Límites de selección para el cristal

A continuación, se esbozan dos diagramas de Ashby, choque y estabilidad térmicos, frente al precio.

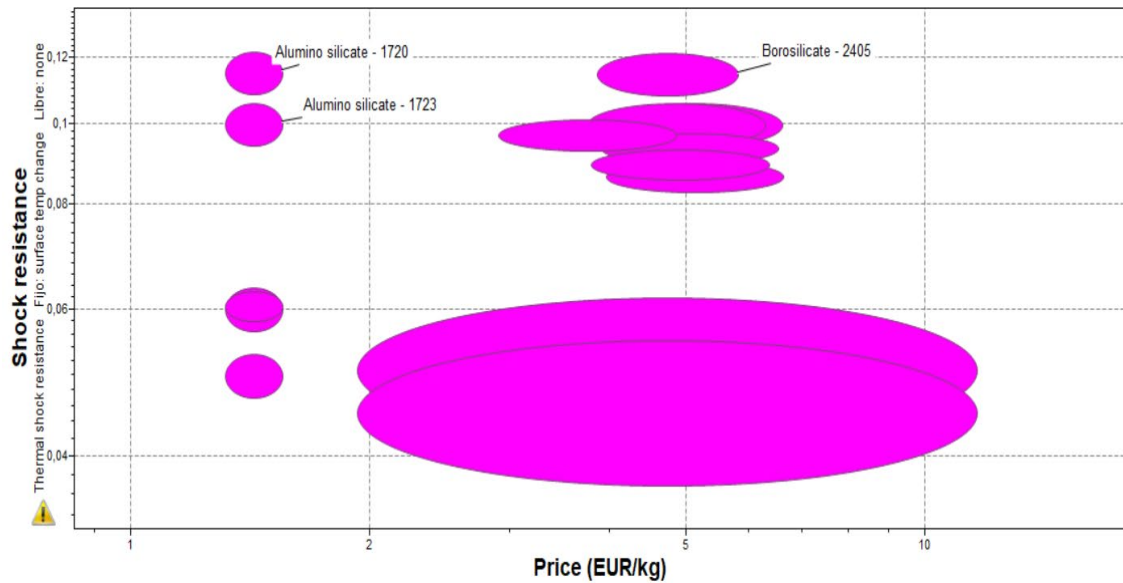


Figura 13: Gráfica choque térmico frente al precio

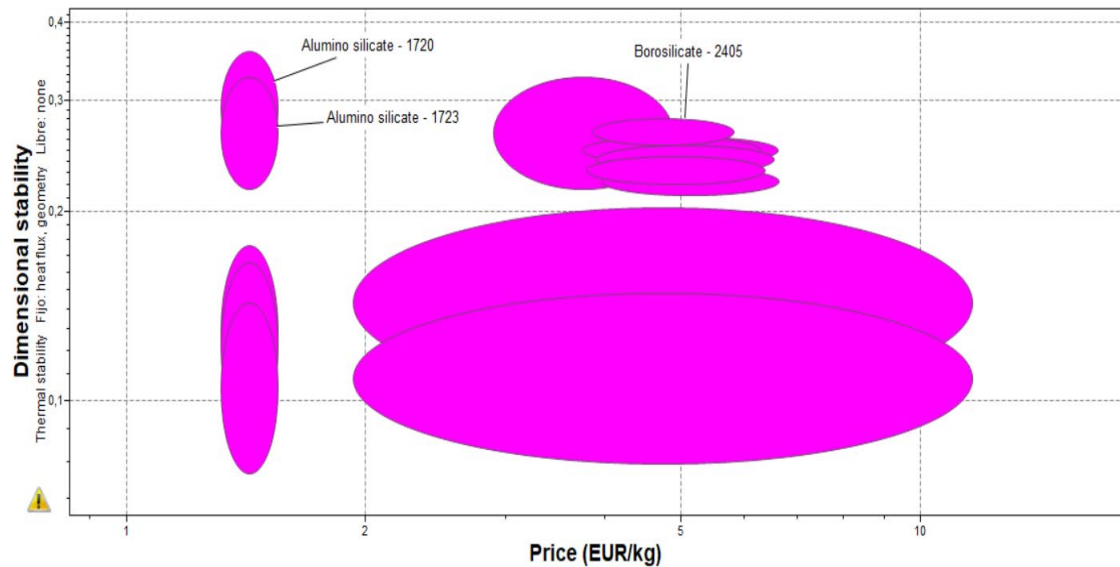


Figura 14: Gráfica estabilidad térmica frente al precio

En ambas gráficas, el objetivo es maximizar tanto la estabilidad térmica como la resistencia al choque térmico, al mismo tiempo que se busca minimizar el coste. Con la aplicación de todos los límites requeridos, se observa una reducción significativa en el número de materiales considerados, hasta alcanzar un máximo de 15 materiales, todos ellos pertenecientes a la familia de vidrios y cerámicas.

El resultado obtenido es similar en ambas gráficas, ya que se logra seleccionar dos materiales que cumplen con todas las restricciones impuestas: los aluminosilicatos 1720 y 1723. Estos materiales exhiben una resistencia al choque térmico similar a la del material base, el borosilicato, lo que asegura su capacidad para soportar cambios bruscos de temperatura sin sufrir daños.

Lo más destacado es que, a pesar de cumplir con los requisitos técnicos, estos materiales presentan un coste considerablemente más bajo en comparación con el material base. Esta reducción en el precio abre la posibilidad de obtener un rendimiento óptimo sin comprometer el presupuesto del proyecto, lo que hace que la selección de estos materiales sea aún más atractiva y viable desde el punto de vista económico.

Una vez hecho esto se procederá a comparar los materiales mediante una tabla de comparación donde se priorizará la resistencia al choque térmico, para evitar la fractura del vidrio durante la vida en servicio de la aplicación, siendo la estabilidad térmica el segundo factor determinante.

	Alumino silicate - 1720	Alumino silicate - 1723	Borosilicate - 2405
^ Propiedades calculadas			
Shock resistance	0,108 - 0,122	0,0943 - 0,106	0,108 - 0,121
Dimensional stability	0,238 - 0,358	0,218 - 0,327	0,255 - 0,281
^ Composition detail (metals, ceramics and glasses)			
Al ₂ O ₃ (alumina) (%)	17	16	1
SiO ₂ (silica) (%)	62	57	70
^ Price			
Price (EUR/kg)	1,31 - 1,55	1,31 - 1,55	3,87 - 5,8
^ Mechanical properties			
Young's modulus (GPa)	84,8 - 89,1	83,9 - 88,1	66,3 - 69,7
Yield strength (elastic limit) (MPa)	39,9 - 43,9	37,6 - 41,4	31,9 - 35,1
^ Thermal properties			
Maximum service temperature (°C)	200 - 650	200 - 650	200 - 480
Thermal conductivity (W/m.°C)	1 - 1,5	1 - 1,5	1,1 - 1,2
Thermal expansion coefficient (µstrain/°C)	4,11 - 4,28	4,5 - 4,69	4,21 - 4,38
^ Optical, aesthetic and acoustic properties			
Transparency	Transparent	Transparent	Transparent
^ Recycling and end of life			
Recycle	✓	✓	✓

Tabla 7: Comparación entre tres posibles materiales para el cristal del horno

Basándose en el análisis de los datos numéricos, se confirma que el material seleccionado, el aluminosilicato 1720, presenta un coste considerablemente inferior al del borosilicato 2405. Este hallazgo resalta la ventaja económica de optar por el aluminosilicato 1720 en lugar del borosilicato 2405, sin comprometer la calidad o el rendimiento del material. Además, esta diferencia de precio podría representar un ahorro significativo en el presupuesto del proyecto, lo que refuerza aún más la elección del aluminosilicato 1720 como la opción preferida desde el punto de vista económico.

	Glass ceramic - 0330	Glass ceramic - 9608
^ Propiedades calculadas		
Shock resistance	1,93 - 2,15	0,413 - 2,07
Dimensional stability	1,66 - 2,07	1,23 - 6,37
^ Composition detail (metals, ceramics and glasses)		
Al ₂ O ₃ (alumina) (%)	20	18
SiO ₂ (silica) (%)	65	70
^ Price		
Price (EUR/kg)	1,93 - 11,6	1,93 - 11,6
^ Mechanical properties		
Young's modulus (GPa)	83,9 - 88,1	83,9 - 88,1
Yield strength (elastic limit) (MPa)	161 - 177	64 - 79
^ Thermal properties		
Maximum service temperature (°C)	527 - 549	700 - 800
Thermal conductivity (W/m.°C)	1,6 - 2	1,9 - 3,3
Thermal expansion coefficient (µstrain/°C)	0,95 - 0,98	0,4 - 2
^ Optical, aesthetic and acoustic properties		
Transparency	Translucent	Translucent
^ Recycling and end of life		
Recycle	×	×

Tabla 8: Comparación entre vitrocerámicas

Si se decide sacrificar la capacidad de inspección visual del contenido del horno, una opción viable sería optar por vitrocerámicas translúcidas, que se muestran en la tabla de comparación. Estos materiales ofrecen mejores propiedades en los índices de optimización y temperatura de servicio en comparación con otras opciones.

Es importante tener en cuenta que las vitrocerámicas translúcidas no son reciclables. Sin embargo, dado que el horno está diseñado para tener una vida útil prolongada, el factor de reciclabilidad no es un criterio de selección crucial, a menos que esté específicamente requerido por la normativa aplicable. En consecuencia, la decisión de elegir las vitrocerámicas translúcidas puede ser una elección sólida y eficiente en términos de rendimiento y optimización, sin comprometer la durabilidad y la viabilidad a largo plazo del horno.

3.1.4 Recubrimiento de la cámara de combustión y bancada

Se sigue con los ladrillos refractarios que compondrán el interior de la hornilla o cámara de combustión, es la zona del horno que cubre el mechero, la zona de máxima temperatura. Los materiales refractarios de arcilla están compuestos básicamente por caolinita con pequeñas cantidades de óxidos de Fe, de Ti, cuarcita y álcalis. La mayor parte de los refractarios se emplea en forma de ladrillos y son utilizados en aplicaciones de alta temperatura para reducir las

pérdidas de calor y ahorrar combustible. Como explican Púertolas et al. (2016) una clasificación de los refractarios con relación a su comportamiento a altas temperaturas es:

Refractarios ácidos: Estos materiales, con un contenido del 25-45% de Al_2O_3 , resisten bien el ataque químico por ácidos, pero fallan en temperaturas en ambientes básicos. Además, ofrecen una moderada resistencia al choque térmico, bajos coeficientes de expansión térmica y baja conductividad térmica.

Refractarios básicos: Estas cerámicas se obtienen de la magnesita, dolomita, cromita, magnesio cromita y sus combinaciones.

Refractarios especiales: Se incluyen en este apartado los denominados de alto y extra alto contenido de alúmina y que ofrecen una elevada estabilidad en su volumen hasta temperaturas de 1800 °C, al igual que el circón. Los refractarios de mullita se caracterizan por su elevada resistencia mecánica a alta temperatura.

Atributo:	Constantes
Al ₂ O ₃ (alumina) (%)	25 a 45
Y Maximum service temperature (°C)	≥ 300
Y Water (fresh)	Excellent
Y Flammability	Non-flammable

Tabla 9: Límites de selección para el material refractario

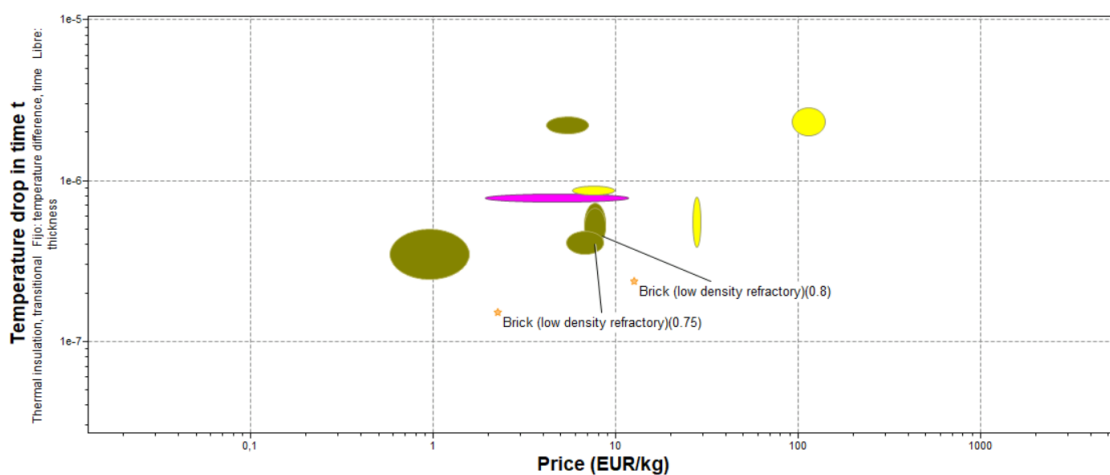


Figura 15: Gráfica "temperature drop in time frente al precio"

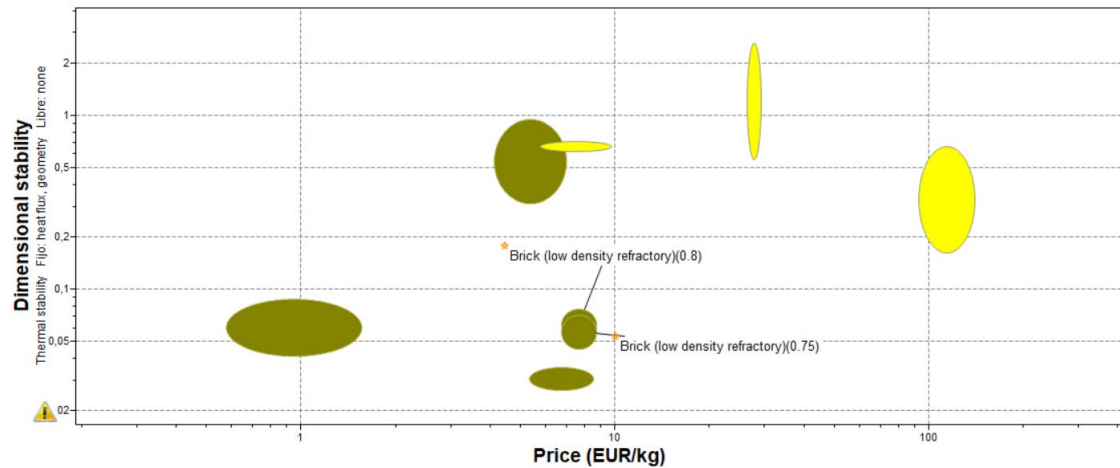


Figura 16: Gráfica estabilidad térmica frente al precio material refractario

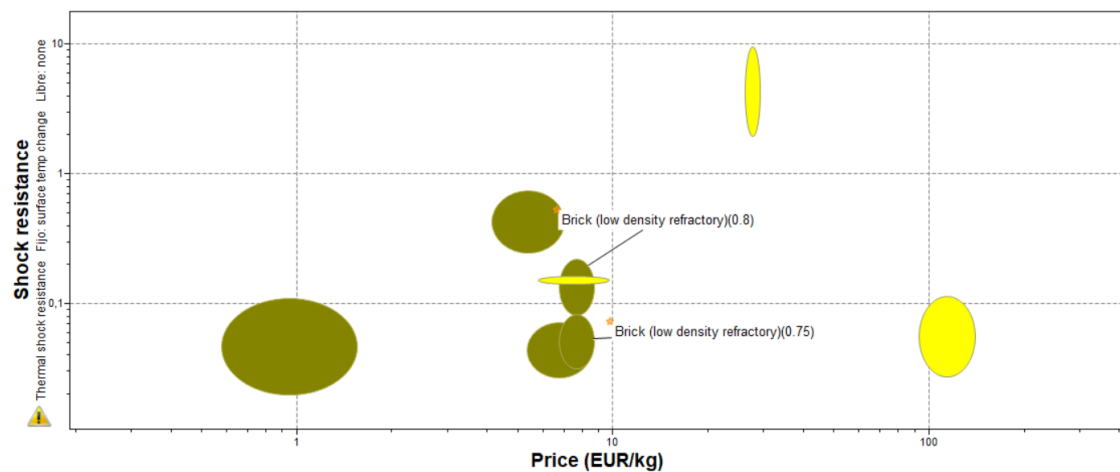


Figura 17: Gráfica choque térmico frente al precio material refractario

De acuerdo con los límites establecidos se trabaja solamente con nueve materiales lo que permite poder mirar cada una de las características y usos comunes de los nueve materiales. Dos de los materiales seleccionados son ladrillos refractarios de baja densidad (0.8) y (0.75).

El uso común del ladrillo refractario de baja densidad de 0.75 es como aislamiento general de los hornos. Esto se debe a que existen hornos de obra que se construyen mediante ladrillos, es por esto que se usa esta clase de materiales, en cambio el horno pocket es un horno montable y desmontable que puede ser trasladado de ubicación si se desea. Por esta razón se elige el ladrillo refractario de baja densidad 0.8 cuyo uso común es en hornos rotatorios.

En resumen, la elección del ladrillo refractario se basa en los usos habituales de ambos materiales porque tienen propiedades prácticamente idénticas, el precio oscila en los mismos rangos desde 6,77 a 8,7 euros el kilogramo. Cabe destacar que en cuanto al choque térmico, el ladrillo de 0,8 tiene mejores propiedades, pues al estar en pleno contacto con la llama producida por los quemadores, interesa que aguante grandes variaciones de temperatura.

3.2 Creación de planchas para las paredes del horno

Se ha desarrollado un material multicapa compuesto por tres capas. Las capas exterior e interior están fabricadas con acero inoxidable 205, mientras que la capa central está hecha de espuma de aluminio, la cual actúa como material aislante.

Para evaluar el desempeño del material compuesto, se han elaborado diversas gráficas comparativas que muestran el rendimiento de los materiales individuales por separado, así como el comportamiento del material combinado. Estas gráficas permiten analizar y visualizar cómo cada componente contribuye al rendimiento global del material multicapa.

Un aspecto crucial para considerar es el coste de los materiales utilizados. Por ello, se ha incluido una gráfica específica que resalta el precio de los diferentes materiales. Esta gráfica es esencial para determinar la viabilidad económica del material compuesto en comparación con los materiales individuales. Al tener en cuenta tanto el rendimiento térmico como el coste, se puede realizar una evaluación más completa y precisa de las opciones disponibles.



Figura 18: Gráfica del precio entre materiales vírgenes y el material multicapa

En la gráfica que representa los precios, se observa que el acero inoxidable es la opción más económica, destacando por su accesibilidad. Por otro lado, el material más costoso es el aislante, superando la cifra de 20 euros por kilogramo. Dentro de este panorama, el material recién desarrollado se sitúa en un punto intermedio en términos de coste, oscilando entre los 9 y 10 euros por kilogramo. Este rango se considera bastante aceptable, ya que ofrece un equilibrio entre calidad y asequibilidad, lo que lo convierte en una opción atractiva para una variedad de aplicaciones industriales y comerciales.

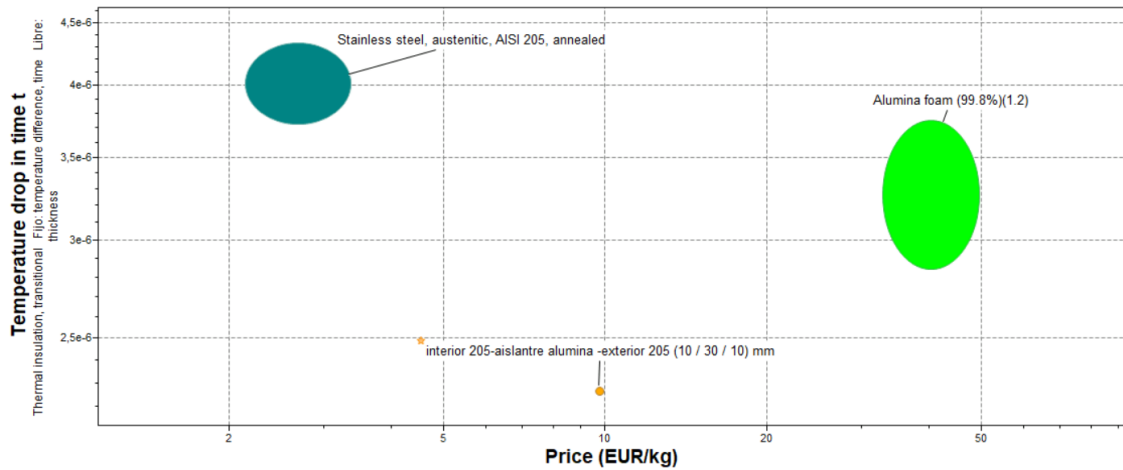


Figura 19: Gráfica "temperature drop in time t frente al precio"

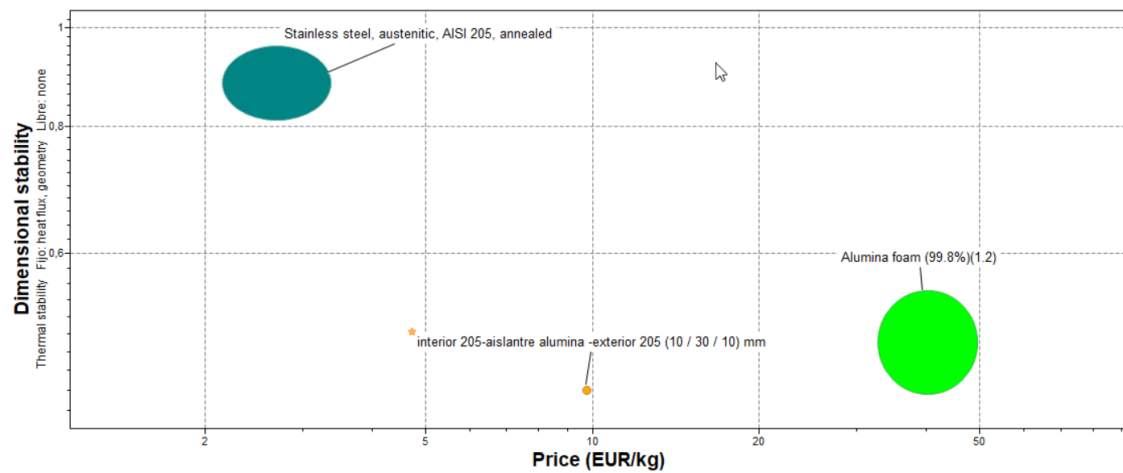


Figura 20: Gráfica estabilidad térmica frente al precio

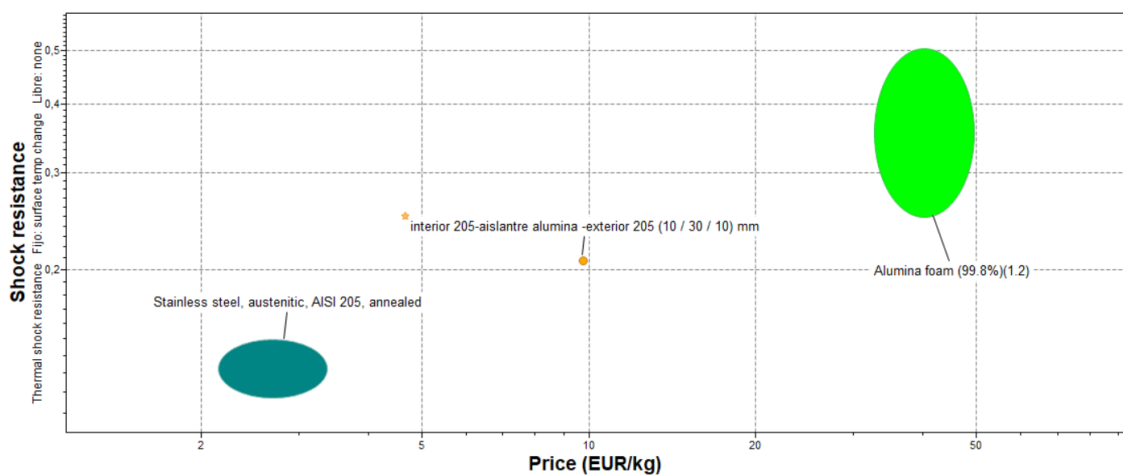


Figura 21: Gráfica choque térmico frente al precio

En los diagramas de Ashby que se han analizado, destaca consistentemente que el material multicapa ocupa una posición intermedia en comparación con los materiales vírgenes, ya sea

que estemos maximizando o minimizando el índice de rendimiento. Esto sugiere que se ha logrado un equilibrio notable en el diseño, lo que representa un avance significativo al mejorar las seis paredes que conforman el horno pocket.

Para complementar esta mejora, se ha tomado la decisión estratégica de fabricar los soportes para las planchas multicapa utilizando acero inoxidable 205 austenítico. Esta elección se fundamenta en la accesibilidad económica que ofrece este tipo de acero, lo que facilita el proceso de fabricación y reduce los costes asociados. Además, al utilizar el mismo material para los soportes, se garantiza una coherencia en términos de propiedades físicas y químicas, lo que contribuye a la eficiencia y durabilidad general del sistema.

	Alumina foam (99.8%) (1.2)	interior 205-aislante alumina -exterior 205 (10 / 30 / 10) mm	Stainless steel, austenitic, AISI 205, annealed
^ Propiedades calculadas			
Shock resistance	0,25 - 0,503	0,209	0,118 - 0,15
Dimensional stability	0,437 - 0,552	0,441	0,814 - 0,96
Temperature drop in time t	0,00000285 - 0,00000375	0,00000227	0,00000373 - 0,00000433
^ Price			
Price (EUR/kg)	32,8 - 49,4	9,72	2,14 - 3,36
^ Physical properties			
Density (kg/m^3)	1180 - 1220	3840	7700 - 7900
^ Mechanical properties			
Young's modulus (GPa)	17,1 - 34,2	93,3	193 - 201
Yield strength (elastic limit) (MPa)	57,8 - 63,8	224	425 - 525
^ Thermal properties			
Thermal conductivity (W/m.*C)	3,1 - 3,9	5,06	15 - 17
Specific heat capacity (J/kg.*C)	820 - 960	580	490 - 530
Thermal expansion coefficient (μstrain/°C)	6,94 - 7,22	11,5	17,1 - 19,1
^ Enlaces			
ProcessUniverse	9	0	127

Tabla 10: Comparación entre materiales vírgenes y el material multicapa

Se ha adjuntado una tabla comparativa que proporciona datos cuantitativos, lo que nos permite ser más precisos y exactos al hablar sobre precios y propiedades térmicas relevantes para tener en cuenta en un horno de pan. Esta información resulta imprescindible para tomar decisiones en el proceso de diseño y selección de materiales para el horno. Al considerar tanto los aspectos económicos como las propiedades térmicas, podemos garantizar un rendimiento óptimo del horno, asegurando una cocción uniforme y eficiente de los productos horneados.

3.3 Cálculo de medidas físicas

Para la realización de un part cost estimator (estimación de costes de producción), es necesario saber las medidas de cada una de las partes del horno así de como su peso, de esta manera al hacer el cálculo de los costes de fabricación de cada material no solo se tendrá en cuenta la cantidad de material usado si no que se cuenta con los procesos de fabricación para obtener el material con su forma final.

Las medidas son tomadas a mano a partir de un horno instalado en una panadería, de forma que se trabajará con medidas reales para que el cálculo del coste final de lote sea lo más exacto posible.

Material	Medidas horno			Densidad (Kg/m3)
	Alto (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)	
AISI 205 (Laterales)	205	113	1	7800
AISI 205 (tapas)	113	113	1	
Aluminosilicato 1720	87	33,5	0,75	2510
Espuma de alúmina (Laterales)	113	113	3	1200
Espuma de alúmina	205	113	3	

Tabla 11: Medidas del horno y densidades de los materiales seleccionados

Para calcular el peso aproximado de todos los componentes de un horno, se puede utilizar la fórmula básica de la Física que relaciona la masa (peso) de un objeto con su volumen y densidad.

El peso de una lámina de acero en uno de los laterales es de 180,68 kg, hay que tener en cuenta que van montadas dos láminas de acero junto con el material aislante. Es un peso excesivo para su transporte y montaje. Por esta razón, se decide dividir las paredes del horno en seis partes iguales y las tapas también se dividirán en 4 partes iguales.

Material	Peso(Kg)
AISI 205 (tapas) 1 de 4	24,94
AISI 205 (laterales) 1 de 6	30,14
Aluminosilicato 1720	5,5
Espuma de alúmina (tapas) 1 de 4	11,25
Espuma de alúmina (Laterales) 1 de 6	13,9

Tabla 12: Pesos de cada una de las partes del horno

A la vista de los resultados, se reduce significativamente el peso de una sola lamina de acero. Pero aun dividiendo cada lamina en seis partes, sigue pesando demasiado. Por esta razón se decide buscar un material alternativo que sea menos denso que el actual, esto puede implicar un aumento de costes, pero facilidades a la hora de montaje llevando a reducir la cantidad de horas de montaje y por lo tanto reducir costes de mano de obra. Esto puede suponer importantes beneficios para la salud de los operarios pues no siempre la maquinaria puede acceder a las panaderías y el montaje suele ser a mano.

3.3.1 Material alternativo al acero AISI 205 para reducir el peso de los componentes del horno.

Debido a la elevada densidad de del acero inoxidable 205 se pretende aligerar las paredes del horno de forma que puedan ser de una sola pieza, se procede a buscar un material con menor densidad.

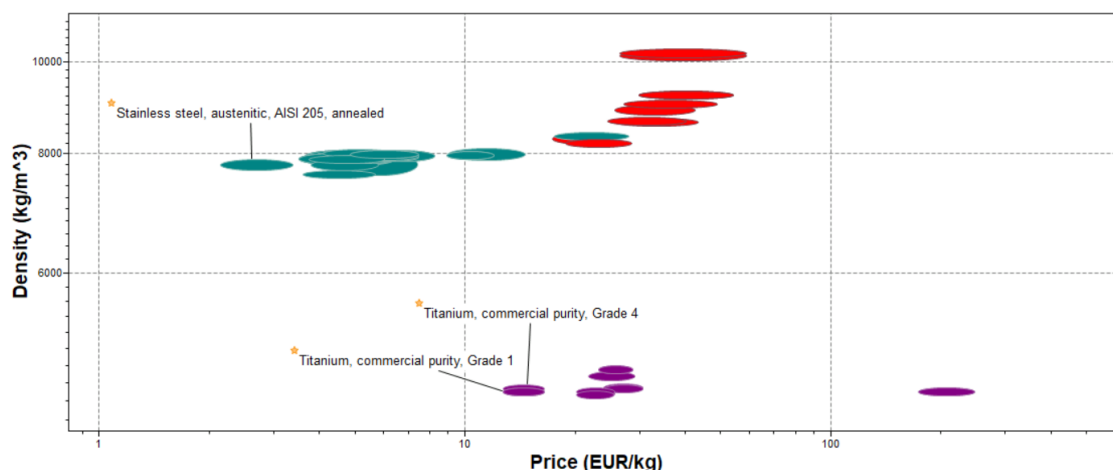


Figura 22: Gráfica densidad frente a precio

En la siguiente gráfica se compara la densidad frente al precio, de forma que se observa que interesa trabajar en rangos de densidades menores que 6000 Kg/m³. Una vez en este rango los materiales más baratos son el titanio de pureza comercial grado 1 y grado 4. Mangonon (2001), expresa que el titanio se utiliza en aplicaciones que requieren una resistencia mecánica moderada en combinación con buena formalidad y resistencia a la corrosión, la mayor parte de las aplicaciones actuales del titanio comercialmente puro se derivan de su excelente resistencia a la corrosión y buena soldabilidad.

Material	Medidas horno			Densidad (Kg/m ³)
	Alto (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)	
Titanio de pureza comercial grado 1 (Laterales)	205	113	1	4510
Titanio de pureza comercial grado 1 (Tapas)	113	113	1	

Tabla 13: Medidas del horno y densidad del titanio de pureza comercial

Aplicando la fórmula de la densidad se calcula el peso de solo una sola plancha de titanio, que ronda los 104,47 Kg para la plancha lateral y unos 57,59 Kg para las tapas. Hay que tener en cuenta que cada pared o tapa del horno se compone de 2 planchas de titanio, por lo tanto, el peso total para las tapas es de 208,94 Kg y de 115,18 Kg para las tapas.

Sigue siendo un peso elevado para el manejo de cada una de las partes, suponiendo problemas a la hora del transporte y llegando a ser perjudicial para la salud de los operarios. Por esta razón se opta por dividir las tapas en cuatro partes iguales y los laterales en seis partes iguales.

Material	Peso(Kg)
Titanio de pureza comercial grado 1 (Tapas) 1 de 4	14,42
Titanio de pureza comercial grado 1 (Laterales) 1 de 6	17,42

Tabla 14: Tabla de pesos diferentes partes del horno

Se observa que se reduce la mitad el peso de las planchas de titanio, por lo tanto, la solución de considerar el titanio un material alternativo al acero inoxidable 205 podría ser válida.

4. PART COST ESTIMATOR (ESTIMACIÓN DE COSTES DE PRODUCCIÓN)

Cuando se eligen materiales, el coste siempre es una consideración importante. Sin embargo, el coste de un componente no solo depende de la cantidad de material utilizado, sino también de los procesos de manufactura necesarios para convertirlo en su forma final. Estos costes pueden ser difíciles de determinar, particularmente en las primeras etapas del desarrollo, cuando aún no se han especificado los detalles del diseño.

En este apartado se estima los costes de las piezas, disponible con la Herramienta Synthesizer, que permite una comparación rápida del precio para diferentes cadenas de materiales y procesos.

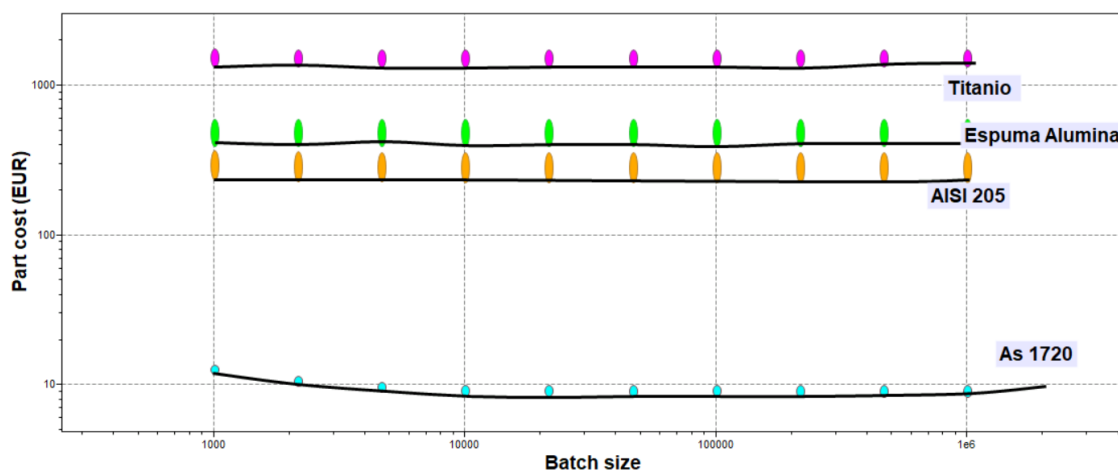


Figura 23: Gráfica tamaño de lote frente a precio con la herramienta part cost estimator

En el gráfico presentado, se pueden distinguir diversos tamaños de lote que abarcan desde pequeñas cantidades hasta mayores volúmenes de producción. Es notable que, en el caso de materiales como el titanio, la espuma de alúmina y el acero 205, el precio se mantiene prácticamente constante a lo largo de los distintos tamaños de lote. Esto sugiere que el coste principal de estos materiales reside en su propia composición y propiedades, más que en el proceso de obtención o fabricación.

Por otro lado, en el caso del aluminosilicato, se evidencia una tendencia diferente. Aquí, se observa una reducción significativa en el precio a partir de un tamaño de lote de 10.000 unidades. Esta disminución en el coste puede atribuirse a economías de escala o eficiencias logradas en el proceso de producción a medida que se aumenta el volumen de fabricación.

Dada esta variabilidad en el comportamiento del precio en función del tamaño del lote, resulta crucial analizar y considerar detenidamente el impacto que cada tamaño de lote tiene en la viabilidad económica y en la estrategia de producción para cada uno de los materiales propuestos. En particular, será fundamental examinar de cerca el punto en el que se alcanza la optimización del coste para cada material, lo que permitirá tomar decisiones informadas y maximizar los beneficios en el proceso de fabricación.

En el análisis económico se reflejan tres secciones fundamentales, cada una de las cuales proporciona información crucial para la toma de decisiones en el proceso de fabricación. La primera sección se centra en los detalles del componente introducidos manualmente, que parten de un horno ya instalado. Esta sección abarca aspectos específicos y técnicos del componente.

La segunda sección se dedica a los datos correspondientes al proceso de producción primario. Aquí se incluyen todas las etapas principales de la manufactura, desde la preparación de los materiales hasta el ensamblaje final del componente. Esta parte del análisis ofrece una visión integral de las operaciones necesarias para transformar las materias primas en productos terminados, destacando los costes asociados con cada etapa y la eficiencia del proceso.

En los atributos adicionales se desglosa específicamente el capital inicial que habría que aportar para la fabricación de un lote de 10.000 unidades. Este desglose es esencial para comprender la inversión necesaria y planificar adecuadamente los recursos financieros. Según el análisis, el total del capital inicial requerido para el aluminosilicato asciende a unos 23.940 euros. Esta cifra incluye costes como la adquisición de materiales, la preparación del equipo, y otros gastos preliminares que deben cubrirse antes de iniciar la producción. Así mismo el coste del acero inoxidable sería 841.500 euros, mientras que para el aluminio el coste de fabricación sería el mismo, mientras que lo caro es la adquisición de la propia materia prima. Finalmente, la espuma de alúmina asciende a un total de 36.150 euros.

5. CONCLUSIONES

A la vista de lo expuesto en el presente documento, se van a dar una serie de conclusiones a modo de resumen, así como una valoración personal de todo lo aprendido en el proceso.

5.1 Resultados obtenidos

Después de muchas horas de esfuerzo y dedicación es importante recalcar que el trabajo cumple con el objetivo que motivó su realización y puede afirmarse que la optimización de materiales para abaratar el coste global del horno ha sido plenamente satisfactoria. A continuación, se detallan los resultados obtenidos más relevantes, fruto del trabajo realizado es este proyecto:

-Parte exterior e interior del horno: Se han propuesto dos materiales optimizados desde dos puntos de vista. Desde el enfoque económico, el material más adecuado es el acero inoxidable AISI 205. Este acero cumple ampliamente con todas las exigencias del proceso de selección, además de ser económico y de fácil producción. Sin embargo, su inconveniente es la alta densidad, lo que puede complicar su manejo debido a su elevado peso.

Por esta razón, se decidió buscar un material menos denso, aunque su coste sea mayor. El material elegido es el titanio de pureza comercial grado 1, el cual permite reducir significativamente el peso de cada una de las paredes del horno.

-Aislante: El aislante es uno de los materiales más importantes que conforman el horno, gracias a este material evitamos pérdidas de calor en el interior del horno maximizando el proceso de cocción y evitando que el calor se escape por las paredes del horno.

Uno de los requerimientos más importantes para este material, será su forma física, es decir el material debe presentarse en forma de fibra, espuma o como panal de abeja con esto conseguimos reducir el peso y maximizar la superficie de absorción del calor. Se ha optado por la espuma de alúmina cumpliendo con todos de los límites impuestos.

-Cristal de la puerta/ Mampara: El cristal es un elemento visual, puede parecer un elemento decorativo, pero cumple una función muy importante para el artesano pues le permite controlar el estado del producto sin tener que abrir el horno. El control visual que proporciona el cristal asegura que el artesano pueda supervisar continuamente el progreso de la cocción y realizar ajustes en tiempo real, si es necesario, sin interrumpir el proceso. Esto resulta en una mayor eficiencia y precisión en la producción, garantizando que el producto final cumpla con los estándares de calidad esperados. El material elegido es el aluminosilicato 1720, material transparente que cumple con creces toda y cada una de las exigencias.

-Recubrimiento de la cámara de combustión: La cámara de combustión es la zona de máxima temperatura del horno, pues está en pleno contacto con la llama. Se elige el ladrillo refractario de baja densidad (0.8), este ladrillo, puede ser usado también en la bancada del horno pues las cerámicas son materiales que soportan muy bien la compresión, por lo tanto, el horno puede ir montado sobre una superficie de este material.

-Creación de un material multicapa: En este apartado se pretende crear un solo material y ver las ventajas que presenta frente a los materiales vírgenes, este material se compone de dos planchas de acero y en cuerpo del material aislante, esbozando las gráficas se observa que el

material creado siempre se encuentra en medio de la espuma de alúmina como el acero 205, esto indica que la opción de vender planchas fabricadas de estos materiales puede ser válida.

5.2 Valoración personal

La realización del presente trabajo ha supuesto para mí un gran desarrollo en lo personal ya que, por fin, aunque sea en el marco teórico, he podido conocer desde dentro el mundo de los hornos, un elemento muy presente en mi vida y que hasta ahora nunca los había investigado. Además, he podido dar un enfoque ingenieril a una profesión tan artesanal como es la panadería, por lo que la experiencia ha sido inmejorable para mejorar como ingeniero.

Por otro lado, he podido ver de primera mano la cantidad de tiempo y trabajo que es necesaria para la elección de un material que probablemente no sea el adecuado, por esto es importante saber reaccionar ante los imprevistos. Puedo decir que estoy bastante satisfecho con mi aportación realizada al proyecto y todo el trabajo invertido durante estos meses. Además, esta experiencia me será de gran ayuda en los años venideros para afrontar con más ganas los retos que me puedan surgir.

Para finalizar, me gustaría añadir también, que el tutor me ha guiado en todo momento, haciendo que pudiera aprender incluso más en muchos casos. Desde el principio, ha estado a mi lado, ofreciendo claridad en los conceptos más complejos y brindándome las herramientas necesarias para superar cualquier obstáculo.

Nota: Todas las Figuras y tablas del presente trabajo han sido creadas con la herramienta CES Edupack 2023 con el nivel 3 aerospacial de MaterialUniverse.

Granta Design LTD., Cambridge (Reino Unido)

6. BIBLIOGRAFÍA

F. Ashby, M. (2005). *Materials Selection in Mechanical Design* (3.^a ed.).
https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7515640/mod_resource/content/0/Ashby_Materials%20Selection.pdf

F. Ashby, M., & R. H. Jones, D. (1996). *Engineering Materials 1: An Introduction to their Properties and Applications* (2.^a ed.).

F. Ashby, M., & R. H. Jones, D. (1998). *Engineering Materials 2: An Introduction to Microstructures, Processing and Design* (2.^a ed.).
https://www.researchgate.net/publication/290696921_Engineering_Materials_2_An_Introduction_to_Microstructures_Processing_and_Design_Second_Edition
https://archive.org/details/engineeringmater0000ashb_h6o5

Ing. POLIN & C. S.p.A. (2002). *Folleto de Instrucciones Para El Empleo Y La Manutención: Horno Pocket 6065-200* (Vols. 365201-1).

L. Mangonon, P. (2001). *Ciencia De Materiales: Selección y Diseño* (1.^a ed.).
<https://es.scribd.com/document/459163612/Ciencia-de-Materiales-Pat-L-Mangonon-1ed-pdf>

Marinelli, M. F., Mendez, A., & Moran, E. (2016). *PROCESO DE FABRICACION DEL VIDRIO* [Tesis, Universidad José Antonio Páez].
<https://ppqujap.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/05/proceso-de-fabricacion-del-vidrio.pdf>

Mukherjee, S., Asthana, A., Howarth, M., Mcneill, R., & Frisby, B. (2019). Achieving Operational Excellence for Industrial Baking Ovens. *Energy Procedia*, 161, 395-402.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.100>

Ojo, O., Adeleke, K., Ajayeoba, A., & Bello, K. (2021). *Development of a Prototype Inverter Powered Baking Oven*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Development-of-a-Prototype-Inverter-Powered-Baking-Ojo-Adeleke/260b62017b9493036ae95afc665269400f14d1a3>

Okoronkwo E.N., Nnam R.E., Adindu P.U. (2022), Design and Characterization of a Gas-Powered Baking Oven Fabricated with Local Engineering Materials. *Advanced Journal of Science, Technology and Engineering* 2(1), 63-77. DOI: 10.52589/AJSTE-9CCAIO1B

Oluwabusayo Akinyemi, A. (2018). Design, Fabrication and Performance Evaluation of a Domestic Electric Oven. *Journal Of Scientific And Engineering Research*, 5(4), 105-109. <https://jsaer.com/download/vol-5-iss-4-2018/JSAER2018-05-04-105-109.pdf>

Púertolas, J. A., Ríos, R., & Castro, M. (2016). *Tecnología de los materiales en ingeniería.: Metales y aleaciones, polímeros, materiales compuestos, cerámicas y técnicas de conformado* (Vol. 1).

Púertolas, J. A., Ríos, R., & Castro, M. (2016). *Tecnología de los materiales en ingeniería.: Metales y aleaciones, polímeros, materiales compuestos, cerámicas y técnicas de conformado* (Vol. 2).

Rana, M., Yasmin, S., Mahomud, M. S., Noor, F., & Sarker, M. S. H. (2023). Development and performance evaluation of an improved electric baking oven for baked products. *Food Science & Nutrition*, 11(6), 3057-3066. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3287>

7. ÍNDICES DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de un horno pocket.....	9
Figura 2: Ejemplo de distintas líneas de índice con diferentes pendientes.....	11
Figura 3: Procesos de forma y unión parte exterior e interior	13
Figura 4: Gráfico coste por unidad de transferencia frente a precio.....	15
Figura 5: Coste por unidad de transferencia frente a precio con recta de índice de pendiente dos	15
Figura 6: Gráfica estabilidad térmica frente al precio	17
Figura 7: Estabilidad térmica frente al precio con recta de índice con pendiente uno.....	17
Figura 8: Gráfica choque térmico frente al precio.....	18
Figura 9: Gráfica choque térmico frente al precio con recta de pendiente uno	19
Figura 10: Gráfico caída temperatura frente al precio con recta de pendiente uno.....	21
Figura 11: Estabilidad térmica frente a precio con recta de pendiente uno	22
Figura 12: Gráfica de choque térmico frente a precio con recta de pendiente uno	22
Figura 13: Gráfica choque térmico frente al precio.....	25
Figura 14: Gráfica estabilidad térmica frente al precio	25
Figura 15: Gráfica " temperature drop in time frente al precio"	28
Figura 16: Gráfica estabilidad térmica frente al precio material refractario	29
Figura 17: Gráfica choque térmico frente al precio material refractario.....	29
Figura 18: Gráfica del precio entre materiales vírgenes y el material multicapa	30
Figura 19: Gráfica "temperature drop in time t frente al precio"	31
Figura 20: Gráfica estabilidad térmica frente al precio	31
Figura 21: Gráfica choque térmico frente al precio.....	31
Figura 22: Gráfica densidad frente a precio	34
Figura 23: Gráfica tamaño de lote frente a precio con la herramienta part cost estimator	35
Figura 24: Bases de datos del nivel 3	43
Figura 25: herramienta synthesizer	44
Figura 26: menú material multicapa	44
Figura 27: menú part cost estimator	45
Figura 28: Resumen aluminosilicato 1720.....	46
Figura 29: Resumen acero inoxidable AISI 205	46
Figura 30: Resumen titanio pureza comercial grado 1	47
Figura 31: Resumen espuma de alúmina	47

8. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades más usadas en el diseño de un componente.....	10
Tabla 2 Límites de selección del material exterior	14
Tabla 3: Comparación de los posibles materiales para la parte exterior del horno.....	19
Tabla 4: Límites de selección para el material aislante	20
Tabla 5: Comparación de la espuma de alumina con la sílice	23
Tabla 6: Límites de selección para el cristal	24
Tabla 7: Comparación entre tres posibles materiales para el cristal del horno	26
Tabla 8: Comparación entre vitrocerámicas.....	27
Tabla 9: Límites de selección para el material refractario.....	28
Tabla 10: Comparación entre materiales vírgenes y el material multicapa	32
Tabla 11: Medidas del horno y desidades de los materiales seleccionados	33
Tabla 12: Pesos de cada una de las partes del horno.....	33
Tabla 13: Medidas del horno y densidad del titanio de pureza comercial.....	34
Tabla 14: Tabla de pesos diferentes partes del horno.....	35

9.ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: índice de rendimiento coste por unidad de transferencia.....	14
Ecuación 2: índice de rendimiento de estabilidad térmica	16
Ecuación 3: índice de rendimiento del choque térmico.....	18
Ecuación 4: índice de rendimiento para la caída de la temperatura.....	21

10. ANEXOS

Avanzado



Figura 24: Bases de datos del nivel 3

Se ha trabajado con la base de datos de nivel 3 aeroespacial, una de las bases más completas que ofrece la base de datos utilizada para el presente trabajo, esta contiene más de 3,000 materiales, incluyendo los materiales del Nivel 1 y 2. El nivel 3 cubre con materiales para el uso en aeronáutica, polímeros, arquitectura e ingeniería civil, bio-materiales, y Eco-diseño, están también disponible.



Figura 25: Herramienta synthesizer

En el menú desplegable de la herramienta synthesizer hay multitud de opciones, se han usado los modelos de material multicapa para la creación de un material compuesto y part cost estimator, para calcular los costes de fabricación.

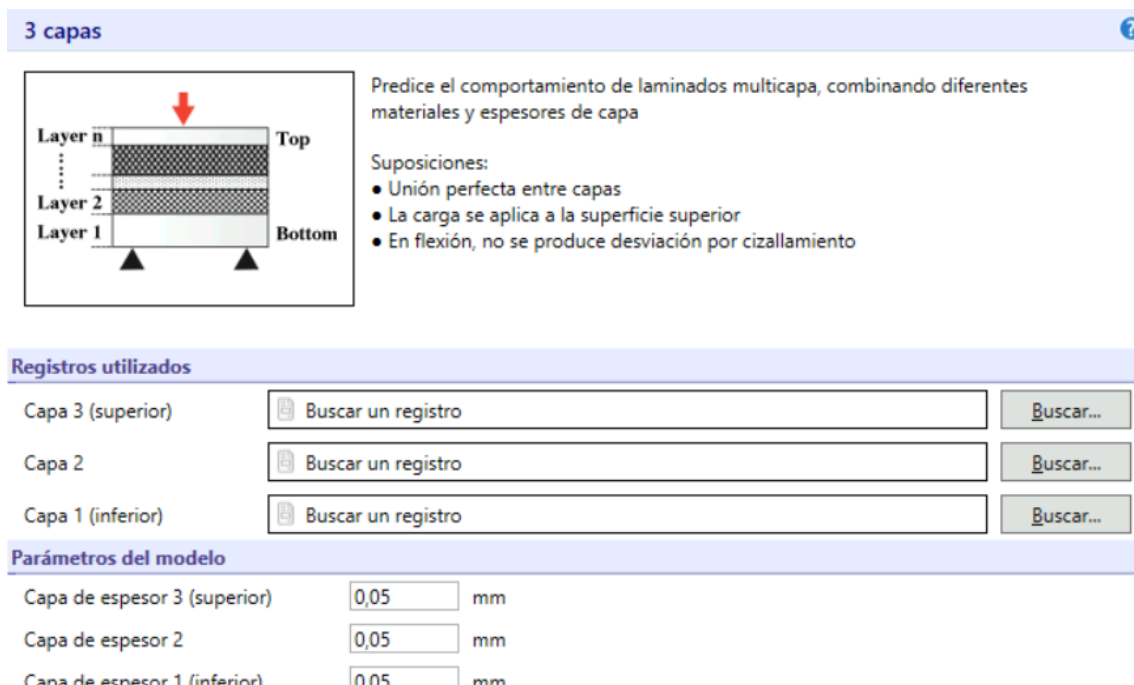
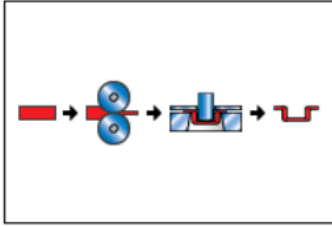


Figura 26: menú material multicapa

En la creación de las paredes del horno se selecciona el material elegido para las partes interior, exterior y central, así como su espesor.

Part cost estimator



Cálculo del coste de la pieza: dirigido al diseño conceptual de la etapa inicial, cuando se están considerando varios materiales y aún no se han definido los detalles del diseño.

Considera:

- Material y hasta dos procesos de conformado
- Tamaño y complejidad de la pieza
- Formato estándar y personalizado
- Opciones para el reciclaje de residuos de fabricación

Detalles del componente

Material

Valor del material de desecho

% del precio virgen

Masa de la pieza

kg

Longitud de la pieza

m

Tamaño del lote

Número de valores:

Proceso de conformación primario

Proceso primario

Disponibilidad

Figura 27: menú part cost estimator

La herramienta part cost estimator ofrece diferentes opciones para cuantificar los costes de fabricación. Así como el porcentaje de material que se quiere reciclar tras el acabado del proceso primario o el número de piezas que se desean fabricar. A continuación, se adjuntan los informes de cada uno de los materiales después de usar la herramienta.

Aluminosilicato 1720

Registros utilizados:

Material = Aluminio silicate - 1720

Proceso primario = Shape drawing

Detalles del componente

Valor del material de desecho = 5 % del precio virgen

Masa de la pieza = 5,5 kg

Longitud de la pieza = 0,87 m

Proceso de conformación primario

Factor de carga = 50 %

Gastos generales = 140 EUR/hr

Tiempo de amortización del capital = 5 years

Disponibilidad = Formato personalizado

Complejidad de la pieza = Compleja

Atributos adicionales:

Tool life (length) - Primary process = 1,55e4 m

Capital cost - Primary process = 2,394e4 EUR

Production rate (length) - Primary process = 911,7 m/hr

Material utilization fraction - Primary process = 0,9

Tooling cost per part - Primary process = 0,3837 EUR

Overhead cost per part - Primary process = 0,1548 EUR

Modelo: Coste, Part cost estimator

Fecha del estudio: miércoles, 5 de junio de 2024

Figura 28: Resumen aluminosilicato 1720

Acero inoxidable AISI 205

Registros utilizados:

Material = Stainless steel, austenitic, AISI 205, annealed

Proceso primario = Hot shape rolling

Detalles del componente

Valor del material de desecho = 5 % del precio virgen

Masa de la pieza = 105 kg

Longitud de la pieza = 2,05 m

Proceso de conformación primario

Factor de carga = 50 %

Gastos generales = 140 EUR/hr

Tiempo de amortización del capital = 5 years

Disponibilidad = Formato personalizado

Complejidad de la pieza = Compleja

Atributos adicionales:

Tool life (length) - Primary process = 2,129e4 m

Capital cost - Primary process = 8,415e5 EUR

Production rate (length) - Primary process = 256,5 m/hr

Material utilization fraction - Primary process = 1

Tooling cost per part - Primary process = 1,051 EUR

Overhead cost per part - Primary process = 0,6954 EUR

Modelo: Coste, Part cost estimator

Fecha del estudio: miércoles, 5 de junio de 2024

Figura 29: Resumen acero inoxidable AISI 205

Titanio de pureza comercial grado 1

Registros utilizados:
Material = Titanium, commercial purity, Grade 1
Proceso primario = Hot shape rolling

Detalles del componente
Valor del material de desecho = 5 % del precio virgen
Masa de la pieza = 105 kg
Longitud de la pieza = 2,05 m
Proceso de conformación primario
Factor de carga = 50 %
Gastos generales = 140 EUR/hr
Tiempo de amortización del capital = 5 years
Disponibilidad = Formato personalizado
Complejidad de la pieza = Compleja

Atributos adicionales:
Tool life (length) - Primary process = 2,129e4 m
Capital cost - Primary process = 8,415e5 EUR
Production rate (length) - Primary process = 256,5 m/hr
Material utilization fraction - Primary process = 1
Tooling cost per part - Primary process = 1,051 EUR
Overhead cost per part - Primary process = 0,6954 EUR

Modelo: Coste, Part cost estimator
Fecha del estudio: miércoles, 5 de junio de 2024

Figura 30: Resumen titanio pureza comercial grado 1

Espuma de alúmina

Registros utilizados:
Material = Alumina foam (99.8%)(1.2)
Proceso primario = Fabric production

Detalles del componente
Valor del material de desecho = 5 % del precio virgen
Masa de la pieza = 11,25 kg
Longitud de la pieza = 2,05 m
Proceso de conformación primario
Factor de carga = 50 %
Gastos generales = 140 EUR/hr
Tiempo de amortización del capital = 5 years
Disponibilidad = Formato personalizado
Complejidad de la pieza = Compleja

Atributos adicionales:
Tool life (length) - Primary process = 7021 m
Capital cost - Primary process = 3,615e4 EUR
Production rate (length) - Primary process = 25,27 m/hr
Material utilization fraction - Primary process = 0,95
Tooling cost per part - Primary process = 0,01297 EUR
Overhead cost per part - Primary process = 5,604 EUR

Modelo: Coste, Part cost estimator
Fecha del estudio: miércoles, 5 de junio de 2024

Figura 31: Resumen espuma de alúmina