



# **INSTITUTO TECNOLÓGICO DE APIZACO**

## **NOMBRE DEL PROYECTO**

**MODELADO 3D EN REDISEÑO DE HORNOS DE FUNDICIÓN**

## **EMPRESA**

**IPM DE TLAXCALA S. DE R.L. DE C.V.**

## **INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

## **PERIODO**

**23 DE ENERO A 24 DE JUNIO DE 2024**

## **ASESOR EXTERNO**

**MTRO. MANUEL ALEJANDRO PARRA RANGEL**

## **ASESOR INTERNO**

**DR. JORGE BEDOLLA HERNÁNDEZ**



# AGRADECIMIENTOS

A mis padres, quienes siempre me han brindado su apoyo y cuyos valores han sido mi guía en todos los momentos importantes de mi vida. Atesoraré por siempre el esfuerzo y sacrificio que hicieron para brindarme una educación profesional. Gracias por siempre haber creído en mí, incluso en los momentos en que la incertidumbre y angustia se apoderaban de mi ser. Este trabajo es tanto mío como suyo, pues sin ustedes, nada de esto habría sido posible. Con toda mi gratitud y cariño.

A mis queridas hermanas, quienes han sido una parte fundamental en toda mi vida. Gracias por estar siempre a mi lado, por celebrar mis éxitos y por animarme en los momentos difíciles. Este trabajo es también para ustedes, con todo mi cariño y agradecimiento.

A mis amigos, quienes han sido una fuente constante de apoyo y alegría en toda mi vida estudiantil. Gracias por su amistad, por estar ahí en los momentos buenos y malos, y por hacer de este camino uno mucho más llevadero. Sus palabras de ánimo, risas compartidas y compañía han sido de gran ayuda para mí.

A los ingenieros de IPM, quienes me brindaron la oportunidad de formar parte de su equipo. Gracias por su confianza, mentoría y por compartir una parte de su vasto conocimiento conmigo. Su apoyo ha sido fundamental para mi crecimiento en el campo de la ingeniería. Aprecio profundamente la oportunidad de haber trabajado con profesionales tan excepcionales. Con gratitud y respeto.

A mis preciados mininos, por haber crecido conmigo durante mi vida universitaria. Gracias por haber permanecido a mi lado en aquellos días de incertidumbre, donde su sola presencia me brindaba sosiego. Siempre sabré que, aún en la distancia, habrá unos pequeños seres de cuatro patas que estarán velando por mí. Con todo mi cariño y agradecimiento por su fiel compañía.



# RESUMEN

En la actualidad, diversas empresas requieren la construcción y/o modernización de sus instalaciones refractarias. Sin embargo, para aprobar el financiamiento de estos proyectos, es necesario contar con datos técnicos precisos que brinden confianza. A partir de este planteamiento surge la necesidad de generar propuestas de valor que aporten una solución eficiente. Estas deben incluir análisis detallados y cálculos precisos que permitan tomar una decisión informada y garantizar el éxito del proyecto.

El objetivo de este proyecto es utilizar herramientas de diseño 3D para contribuir en el desarrollo de propuestas de rediseño de instalaciones refractarias. La problemática se aborda mediante la elaboración de una variedad de diseños utilizados en las industrias. Este proceso contempla el uso de una metodología dividida en varias etapas que permitan un desarrollo estructurado. Esta proporciona los datos técnicos necesarios para elaborar memorias de cálculo que brinden información específica para el desarrollo del proyecto.

Los resultados obtenidos muestran las ventajas de la nueva propuesta respecto a la original. Estos resultados indican que el uso de técnicas 3D tiene un gran impacto en la solución de la problemática.

Teniendo esto en cuenta, se recomienda que los encargados del diseño implementen el uso de las nuevas tecnologías de diseño para la elaboración de propuestas de rediseño. Además, se podría realizar una comparación entre los resultados obtenidos en sitio y lo obtenido mediante software, esto será de utilidad para que la empresa evalúe las ventajas de estas técnicas.



## ÍNDICE

|                                              |    |
|----------------------------------------------|----|
| AGRADECIMIENTOS .....                        | 1  |
| RESUMEN .....                                | 2  |
| CAPITULO I. GENERALIDADES DEL PROYECTO ..... | 7  |
| 1.1 Introducción .....                       | 7  |
| 1.2 Descripción de la empresa .....          | 8  |
| 1.3 Problemas a resolver .....               | 9  |
| 1.4 Objetivos .....                          | 10 |
| 1.5 Justificación .....                      | 10 |
| CAPITULO II. MARCO TEÓRICO .....             | 12 |
| 2.1 La industria a alta temperatura .....    | 12 |
| 2.2 El horno industrial .....                | 12 |
| 2.2.1 Origen del horno .....                 | 12 |
| 2.3 Tipos de horno .....                     | 14 |
| 2.3.1 Horno reverbero .....                  | 14 |
| 2.3.2 Horno rotatorio .....                  | 15 |
| 2.3.3 Horno de crisol .....                  | 15 |
| 2.3.4 Horno de secado .....                  | 16 |
| 2.4 El aislamiento térmico .....             | 17 |
| 2.5 Refractario .....                        | 18 |
| 2.6 Diseño CAD/CAE .....                     | 21 |
| 2.7 Calor .....                              | 22 |
| 2.8 Conductividad térmica .....              | 24 |
| 2.9 Densidad .....                           | 25 |
| 2.10 Chapa metálica .....                    | 25 |
| 2.11 Quemador .....                          | 26 |
| 2.12 Anclas .....                            | 26 |
| 2.13 Análisis térmico .....                  | 27 |
| 2.14 Endoscopia .....                        | 27 |
| 2.15 Alúmina .....                           | 27 |
| CAPÍTULO III. DESARROLLO .....               | 29 |
| 3.1 Selección de materiales .....            | 29 |



|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1.1 Determinación de espesor .....                                           | 29 |
| 3.1.2 Concreto refractarios .....                                              | 30 |
| 3.1.3 Aislantes térmicos .....                                                 | 40 |
| 3.1.4 Materiales seleccionados .....                                           | 48 |
| 3.2 Software de diseño .....                                                   | 49 |
| 3.2.1 Croquis y planos.....                                                    | 49 |
| 3.2.2 Herramientas de diseño .....                                             | 50 |
| 3.3 Ubicación de las capas .....                                               | 51 |
| 3.4 Metodología de diseño (modelo de fases) .....                              | 52 |
| 3.4.1 Análisis del problema .....                                              | 52 |
| 3.4.2 Diseño conceptual.....                                                   | 56 |
| 3.4.3 Esquemas seleccionados.....                                              | 57 |
| 3.4.4 Desarrollo de detalles.....                                              | 65 |
| CAPITULO IV. REDISEÑO DE HORNOS .....                                          | 72 |
| 4.1 Horno de fundición tipo túnel reverbero con bahía de recirculación 1 ..... | 72 |
| 4.1.1 Análisis del problema .....                                              | 72 |
| 4.1.2 Diseño conceptual.....                                                   | 73 |
| 4.1.3 Esquema de detalles 1 .....                                              | 74 |
| 4.1.4 Desarrollo de detalles 1.....                                            | 78 |
| 4.1.5 Análisis Térmico 1 .....                                                 | 82 |
| 4.1.6 Representación de esquemas 2 (cambio de materiales) .....                | 85 |
| 4.1.7 Desarrollo de detalles 2.....                                            | 86 |
| 4.1.8 Análisis Térmico .....                                                   | 87 |
| 4.1.9 Representación de esquemas 3 (reducción de espesor) .....                | 90 |
| 4.1.10 Desarrollo de detalles 3.....                                           | 91 |
| 4.1.11 Análisis térmico.....                                                   | 93 |
| 4.1.12 Interpretación de los resultados .....                                  | 97 |
| 4.1.13 Conclusión .....                                                        | 97 |
| 4.2 Horno de fundición tipo túnel reverbero con bahía de recirculación 2 ..... | 98 |
| 4.2.1 Análisis del problema .....                                              | 98 |
| 4.2.2 Diseño conceptual.....                                                   | 99 |
| 4.2.3 Representación de esquemas 1 .....                                       | 99 |



|                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2.4 Desarrollo de detalles 1.....                                            | 102 |
| 4.2.5 Análisis térmico .....                                                   | 105 |
| 4.2.6 Representación de esquemas 2 (cambio de materiales) .....                | 108 |
| 4.2.7 Desarrollo de detalles 2.....                                            | 109 |
| 4.2.8 Análisis térmico .....                                                   | 109 |
| 4.2.9 Representación de esquemas 3 (reducción de espesor) .....                | 112 |
| 4.2.10 Desarrollo de detalles 2.....                                           | 113 |
| 4.2.11 Análisis térmico.....                                                   | 114 |
| 4.2.12 Interpretación de los resultados .....                                  | 117 |
| 4.2.13 Conclusión .....                                                        | 118 |
| 4.3 Horno de fundición tipo túnel reverbero con bahía de recirculación 3 ..... | 119 |
| 4.3.1 Análisis del problema .....                                              | 119 |
| 4.3.2 Desarrollo conceptual.....                                               | 120 |
| 4.3.3 Representación de esquemas 1 .....                                       | 120 |
| 4.3.4 Desarrollo de detalles 1.....                                            | 123 |
| 4.3.5 Análisis térmico .....                                                   | 126 |
| 4.3.6 Representación de esquemas 2 (cambio de materiales) .....                | 130 |
| 4.3.7 Desarrollo de detalles 2.....                                            | 131 |
| 4.3.8 Análisis térmico .....                                                   | 131 |
| 4.3.9 Representación de esquemas 3 (reducción de espesor) .....                | 133 |
| 4.3.10 Desarrollo de detalles 3.....                                           | 133 |
| 4.3.11 Análisis térmico.....                                                   | 135 |
| 4.3.12 Interpretación de los resultados .....                                  | 139 |
| 4.3.13 Conclusión .....                                                        | 139 |
| 4.4 Horno de secado .....                                                      | 140 |
| 4.4.1 Análisis del problema .....                                              | 140 |
| 4.4.2 Diseño conceptual.....                                                   | 141 |
| 4.4.3 Representación de esquemas.....                                          | 141 |
| 4.4.4 Desarrollo de detalles.....                                              | 145 |
| 4.4.5. Análisis térmico .....                                                  | 146 |
| 4.4.6 Conclusión .....                                                         | 149 |
| 4.5 Horno de fundición tipo reverbero.....                                     | 150 |



|                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------|-----|
| 4.5.1 Análisis del problema .....                              | 150 |
| 4.5.2 Diseño conceptual.....                                   | 151 |
| 4.5.3 Representación de esquemas 1 (cantidad por demoler)..... | 151 |
| 4.5.4 Desarrollo de detalles 1.....                            | 154 |
| 4.5.5 Representación de esquemas 2 (rediseño de horno).....    | 155 |
| 4.5.6 Vista explosionada .....                                 | 158 |
| 4.5.7 Desarrollo de detalles 2.....                            | 160 |
| 4.5.8 Conclusión .....                                         | 161 |
| CONCLUSIÓN .....                                               | 162 |
| COMPETENCIAS DESARROLLADAS .....                               | 163 |
| FUENTES DE INFORMACIÓN .....                                   | 165 |
| ANEXOS .....                                                   | 168 |



# CAPITULO I. GENERALIDADES DEL PROYECTO

## 1.1 Introducción

En la industria de alta temperatura, el rediseño de hornos de fundición representa un punto importante para mejorar el rendimiento y capacidad de estos equipos.

El rediseño por sí mismo implica mejorar y optimizar el diseño actual con el fin de actualizarlo conforme las nuevas tecnologías y así para resolver problemas específicos. En el contexto de hornos, esto puede incluir; disminuir la temperatura en la cara fría, reducir la cantidad de material o aumentar la capacidad del horno.

Por otro lado, el modelado 3D es una técnica que permite crear representaciones tridimensionales a través de software CAD. La sinergia entre ambos conceptos es fuerte, ya que el modelado 3D facilita bastante el proceso de rediseño.

Esta combinación permite analizar diversas alternativas de diseño de forma sencilla y rápida, permite simular el desempeño térmico que tendrá el equipo en funcionamiento e incluso permite definir acciones necesarias para llevar a cabo la construcción física.

En este proyecto, el proceso de rediseño sigue una metodología por fases para garantizar un avance ordenado. Al segmentar el proyecto, los involucrados pueden verificar el progreso y tomar decisiones que guíen el proyecto hacia una conclusión exitosa. Estas acciones aseguran que las propuestas de valor elaboradas cumplan con los objetivos y criterios deseados.

Este proyecto es el resultado de la fusión de tecnología, creatividad y experiencia en ingeniería.



## 1.2 Descripción de la empresa

**Nombre de la empresa:** IPM DE TLAXCALA S. DE R.L. DE C.V.

**Puesto de trabajo del estudiante:** becario de ingeniería en el área de operaciones.

**Desarrollo teórico:** Calle las canteras No. 15-A, Col. Topilco de Juárez, Xaltocan, Tlaxcala CP 90440

**Desarrollo práctico:** territorio nacional en función de la ubicación de las plantas a las que se les desarrollen proyectos y/o servicios.

**Misión:** colaborar con nuestros socios comerciales mediante la fabricación, distribución, instalación, análisis y asesoría especializada; ofreciendo la mejor experiencia en soluciones integrales a través de procesos de ingeniería personalizada aplicando tecnología y materiales de vanguardia superando sus expectativas de calidad en el servicio.

**Visión:** convertirnos en un elemento esencial para nuestros clientes siendo un referente por nuestros servicios diferenciados y los productos suministrados, desarrollando soluciones innovadoras y amigables con el ambiente que generen mayores beneficios para la industria con personal capacitado, eficiente, responsable y altamente comprometido.

### Valores:

- |                            |                   |
|----------------------------|-------------------|
| • Trabajo en equipo        | • Seguridad       |
| • Desarrollo e innovación  | • Calidad         |
| • Conciencia de los costos | • Mejora continua |
| • Compromiso               | • Pasión          |

**Historia:** nos constituimos en 2009 como persona física atendiendo la demanda local en el estado de Tlaxcala brindando servicios de mantenimiento a sistemas de control industrial, en 2019 evolucionamos a IPM de Tlaxcala S.A.S. y en 2023 migramos a IPM Thermal Solutions como una S. de R.L. de C.V. Hemos crecido conociendo las exigencias del mercado actual en cuanto a Calidad, Tiempo y Costo,



por ello, hemos creado una gama de servicios agregando valor para satisfacer las necesidades de nuestros clientes.

Nos esforzamos día a día incrementando nuestra capacidad para integrar proyectos multi-disciplina aplicando conocimientos y experiencia, así como tecnología a través de profesionales en distintas áreas de especialidad en base a nuestra filosofía operacional bajo el concepto de clúster de servicios industriales, mismo que nos ha permitido ofrecer soluciones innovadoras. Lo anterior nos ha llevado a obtener la confianza y recomendación de nuestros clientes permitiéndonos atender actualmente distintas áreas de especialidad en México, Estados Unidos, Europa y Sur América.

### **1.3 Problemas a resolver**

La construcción de un horno requiere de una cuidadosa planificación y una inversión considerable. Debido a esto surge la necesidad de elaborar propuestas de valor que permitan obtener datos técnicos precisos en los cuales sustentarse para llevar a cabo el proyecto. Con base en lo anterior, los problemas por resolver son los siguientes:

1. Es necesario elaborar un modelo tridimensional que represente al horno en cuestión, respetando dimensiones y consideraciones reales. Este modelo debe incluir el modelado correspondiente al revestimiento térmico utilizado internamente.
2. Se requiere conocer la cantidad de material que es necesario para llevar a cabo su construcción, separándolas por material y sección del horno mediante algún programa de hojas de cálculo.
3. Generar memorias de cálculo a partir de los resultados obtenidos durante el proceso de modelado.
4. Es imprescindible saber la temperatura que existirá en la cara fría del horno.



## 1.4 Objetivos

### Objetivo general

Impulsar técnicas 3D para coadyuvar a la metodología de rediseño de instalaciones refractarias vía modelos virtuales.

### Objetivos específicos

- Desarrollar modelos 3D de instalaciones refractarias de fundición de distintos productos.
- Desarrollar simulación de procesos térmicos que puedan representar un soporte técnico en el sitio de aplicación.
- Desarrollar cálculos estimativos de superficies, volúmenes y masa de materiales en las distintas capas de revestimiento en hornos industriales de fundición.
- Comparar físicamente los resultados obtenidos en los modelos 3D desarrollados contra las instalaciones en sitio.
- Generar información suficiente para la elaboración y publicación de artículo en revista de investigación científica con ISBB o ISSN, así como en revista técnico-comercial internacional de algún giro de industria de fundición de metales o vidrio.

## 1.5 Justificación

El presente trabajo está dirigido a demostrar cómo, mediante el uso de herramientas CAD, es posible brindar certidumbre a las organizaciones y empresas dedicadas a la instalación, reparación y reconstrucción de hornos de fundición. Esta afirmación se sustenta en que, al realizar cálculos precisos en los tantos de materiales necesarios, se minimizan las desviaciones y, por ende, se reducen las mermas en los insumos.



Además, el uso de herramientas CAD permite visualizar y planificar con exactitud cada componente del proyecto. Al contar con un modelo 3D detallado, es más fácil identificar y corregir posibles errores antes de que se conviertan en problemas costosos.

Al conocer con exactitud las cantidades de materiales requeridos, se pueden evitar compras excesivas o insuficientes, lo que no solo ahorra costos, sino que también mejora la eficiencia del proyecto. Este control estricto de los recursos permite a las empresas gestionar mejor sus presupuestos y plazos, garantizando que los proyectos se completen dentro de los límites establecidos.

La capacidad de los modelos CAD para simular distintos escenarios y condiciones de operación permite prever y planificar con mayor anticipación las acciones a realizar, permitiendo una ejecución más fluida y sin contratiempos. Todo esto se traduce en una mejora de la calidad y la confiabilidad de los proyectos realizados.



# CAPITULO II. MARCO TEÓRICO.

## 2.1 La industria a alta temperatura

Dentro de la extensa variedad de industrias que constituyen la economía global, pocas ocupan un lugar tan crucial como la industria de alta temperatura. Al ser el motor que impulsa una amplia gama de procesos industriales esenciales, desde la producción de acero hasta la síntesis de materiales, su influencia se hace presente prácticamente en todos los aspectos de la vida cotidiana.

## 2.2 El horno industrial

Dentro de la industria de alta temperatura los hornos desempeñan un papel fundamental en los diversos procesos dentro de este sector. Su correcta implementación y mantenimiento pueden generar una serie de beneficios para las empresas, incluyendo:

- Mayor eficiencia y productividad
- Reducción de costos
- Mejora de la calidad del producto
- Mayor seguridad para los trabajadores

El Cambridge Dictionary define un horno como un depósito que se calienta a una temperatura muy alta, de modo que las sustancias que se ponen en su interior, como el metal, se derriten o se queman. El principal objetivo de estos equipos es el de realizar procesos a alta temperatura que no podrían realizarse al aire libre, ya que de hacerlo los haría menos eficientes, incrementaría el gasto de combustible y haría el control de proceso más difícil y peligroso.

### 2.2.1 Origen del horno

Estos dispositivos han sido de vital importancia en el avance de las civilizaciones antiguas. Tienen su origen en la necesidad humana de utilizar el calor en actividades que, debido a su naturaleza, no se podrían realizar de manera común, estas



actividades van desde la simple cocción de alimentos hasta procesos más complejos como la fundición de metales. Durante los comienzos de la humanidad, el fuego tuvo una gran importancia, ya que era una fuente de calor durante las noches o en épocas de invierno, un modo de cocer alimentos para facilitar su consumo, así como una protección ante el peligro. Es en este contexto donde surgen los primeros hornos prehistóricos, formados con piedras y barro, cuya función era cocer alimentos.

No fue sino hasta el origen de las civilizaciones mesopotámicas que los hornos recibieron mejoras en su capacidad térmica. Eran usados principalmente para la obtención de yeso mediante la calcinación (calentamiento de una sustancia a temperatura elevada) de aljez (piedra de yeso) a partir de los 300 °C y cal mediante la calcinación de piedra caliza a partir de 900°C. Estos materiales eran utilizados para recubrir recipientes de madera y hacerlos aptos para colocarlos sobre el fuego, siendo estos utensilios los predecesores de la cerámica.

Con el avance y evolución humana surgieron nuevos modos de aprovechar los hornos para la obtención de materiales y producción de productos, se tiene registro de que la vitrificación se originó en el 3000 A.C. durante el período Jemdet Nasr. La fundición de arenas y otros materiales dieron origen a la formación de pequeñas “perlas” de vidrio que eran usadas para la fabricación de collares.

Con el descubrimiento del cobre se dieron los orígenes de la metalurgia. Esto trajo consigo la fabricación de hornos más potentes capaces de fundir este metal. Estos consistían en una cámara de combustión donde se quemaba carbón y una cámara de fundición donde se colocaba el metal a fundir. Poseían grandes conductos de adobe que conducían el aire a la cámara de combustión. El cobre se colocaba en crisoles de barro para posteriormente colocarlo en losas dentro de la cámara de fundición.

## 2.3 Tipos de horno

Existen diferentes tipos de hornos, cada uno con sus propias características y aplicaciones. La elección del tipo de horno adecuado dependerá de las necesidades específicas de cada empresa.

### 2.3.1 Horno reverbero

Son hornos diseñados para fundición de aluminio. Se trata de estructuras rectangulares de acero con un revestimiento interno refractario. La capacidad típica de estos es de 1 hasta 150 Ton. Su característica principal es que “los quemadores calientan las paredes de revestimiento refractario y el techo, que a su vez reverberan o irradian el calor al aluminio fundido en el hogar o baño” (Nick, 2023).

Los quemadores pueden ubicarse en las paredes o en el techo. Tienen un pozo de carga ubicado en alguno de los lados del horno, el cual está separado mediante refractario. Su principal ventaja es su alta capacidad de procesamiento de material y su bajo costo de mantenimiento.



*Imagen 1 HORMESA. (2022). HORNO REVERBERO. Recuperado de <https://hormesa-mexico.com/es/horno-de-reverbero-de-solera-humeda-solera-mixta/>*

### 2.3.2 Horno rotatorio

Son dispositivos cilíndricos de acero revestidos internamente con material refractario. Consisten en un "tambor" que gira dentro de una estructura con rodillos basculantes. En un extremo se encuentra la entrada al horno, mientras que en el otro está la salida de los gases. El quemador se encuentra en el lado frontal de la puerta; este ensamble, además, sirve para la extracción del producto. Una vez que se carga el horno, se cierra y se activa el quemador. Para descargar el material, es necesario inclinar el equipo hacia adelante, mientras que, para cargarlo, se introduce el material por la entrada.



Imagen 2 GHI SMART FURNACES. (2022). HORNO ROTATORIO. Recuperado de <https://www.ghihornos.com/hornos-industriales/fundicion-aluminio/horno-rotativo-basculante/>

### 2.3.3 Horno de crisol

Un crisol es un recipiente fabricado de grafito y arcilla, además de otros materiales. Este tipo de horno es uno de los más antiguos y sencillos de realizar. El material a fundir se coloca en el interior del crisol, mientras se calienta externamente. El crisol es introducido en una cámara de material refractario y posteriormente se tapa durante la etapa de fundición.

Dependiendo del tamaño del crisol será la forma de extraer el material: algunos crisoles requieren de un mecanismo de elevación que permita retirarlos del horno, mientras que otros puedan ser manipulados utilizando pinzas que pueden ser manejadas por uno o más trabajadores.



*Imagen 3 HORMESA. (2022). HORNO DE CRISOL. Recuperado de <https://hormesa.com/portfolio-item/horno-de-crisol-fijo-gas-para-fundicion/>*

#### **2.3.4 Horno de secado**

“En la industria, es común utilizar tratamientos térmicos para modificar las propiedades de ciertos materiales mediante la aplicación de calor dentro de hornos” (NUTEC Bickley, s. f.). Se trata de hornos en los cuales los elementos a secar se colocan en su interior para posteriormente aplicar calor mediante gas.



## 2.4 El aislamiento térmico

“Un material aislante térmico, por definición, es un material que tiene la capacidad de oponerse al paso del calor por conducción, convección y radiación, y se evalúa por su capacidad de aislar térmicamente” (Asturmex, 2023).

Una mala elección de aislante hará que el horno tarde más tiempo en alcanzar su temperatura de operación, lo que se traduce en un aumento significativo en el consumo de combustible y una reducción en la capacidad de producción de este, afectando significativamente el presupuesto de la empresa.

Los aislantes térmicos son uno de los componentes esenciales en cualquier horno, ya que se encargan de evitar pérdidas excesivas de calor hacia el exterior, maximizando su eficiencia.

Su principal objetivo es evitar la transferencia de calor hacia las zonas externas, conservando la mayor cantidad de calor en el interior. Además, evita que se produzcan daños en la carcasa metálica debido a las altas temperaturas de operación.

Se fabrican de diferentes materiales, sin embargo, el más común es:

### 2.4.1 Fibra cerámica

Elaborados a base de sílice, alúmina y otros elementos. Presentan una alta resistencia térmica y baja conductividad térmica, además de que no almacenan calor. Tienen una densidad menor que la de los materiales refractarios. Esta fibra se presenta en diferentes formas, entre las cuales se encuentran:

- Papel: de alto rendimiento, flexible, delgado y de excelente resistencia para aplicaciones térmicas.
- Tabla: aislamiento de respaldo o para aplicación en cara caliente; se utiliza como revestimiento de hornos y superficies calientes.

- Colcha: de alto rendimiento y alta resistencia a la temperatura; se utiliza como revestimiento de estufas de altos hornos y hornos cerámicos.

#### 2.4.2 Beneficios de los aislantes térmicos

- Seguridad en el ambiente de trabajo.
- Reducción de pérdidas energéticas.
- Resistencia al choque térmico.
- Baja densidad.

### **2.5 Refractario**

Son materiales no metálicos que poseen propiedades físicas y químicas que los hacen aptos para aplicaciones en estructuras a las que se aplican temperaturas por encima de 1000 °F (538 °C). Estos materiales son capaces de soportar altas temperaturas sin llegar a descomponerse.

Los materiales más comúnmente utilizados para la elaboración de refractarios son los óxidos de aluminio (alúmina) y de silicio (sílice), la cantidad presente en los refractarios dependerá del fabricante.

Siempre que se vaya a instalar un material refractario es necesario conocer el material con el que estará en contacto, ya que se debe asegurar que sean compatibles entre sí para evitar problemas como corrosión del refractario o liberación de contaminantes en el líquido de trabajo.

#### 2.5.1 Sectores de aplicación

Reyma (2024) enlista algunos sectores industriales en los que se usan materiales refractarios:

- Industria siderúrgica integral: hornos altos, estufas, baterías de horno de cok, mezcladores de arrabio, cucharas, vagones torpedo, hornos eléctricos.



- Industria del acero: hornos eléctricos, convertidores, cucharas, artesas, hornos de desgasificados, hornos de tratamiento térmico y de afino, hornos de laminación de empuje y de vigas galopantes.
- Industria del vidrio: hornos de fusión de vidrio hueco y plano, baños de estaño, hornos de temple.
- Industria metalúrgica: hornos de fusión de cobre, hornos de aluminio, hornos de cocción de ánodos, hornos de pisos y de tostación de piritas, hornos de plomo, torres fusoras.
- Industria del cemento: hornos rotativos, intercambiadores de calor, cabezales de horno, enfriadores de parrilla y de satélites.
- Tratamiento de residuos: hornos de incineración de parrillas, rodillos y lecho fluidificado para residuos sólidos urbanos e industriales y cámaras de combustión.
- Industria cerámica: hornos túnel, de cámara, vagonetas, hornos de bizcochado.
- Industria petroquímica: hornos de nafta, de etano e instalaciones de proceso, calderas, hornos de cracking.
- Industrias varias: hornos verticales y secaderos de pulpa para azucareras, hogares de combustión para centrales eléctricas, cubilotes y hornos de arco para fundiciones, etc., hornos verticales de cal y rotativos para papeleras, hornos de sinterización.

Como se evidencia, los materiales refractarios tienen una amplia aplicación en diversas ramas industriales, lo que resalta su importancia en la fabricación de



elementos de uso cotidiano, como productos de acero o materiales utilizados en la construcción. Esta circunstancia destaca su importancia como componente fundamental en el sector industrial a nivel global.

### 2.5.2 Propiedades

Estos materiales se enfrentarán a entornos hostiles, por lo tanto, es esencial que posean la capacidad de resistir las condiciones adversas en las que se ubiquen. Entre las propiedades relevantes se incluyen:

- Baja conductividad térmica: deben contar con la capacidad de limitar la transferencia de calor hacia las zonas externas del horno.
- Resistencia a la compresión: la principal característica que debe tener un refractario, se refiere a la capacidad de soportar grandes cargas sin modificar su forma o estructura.
- Interacción química: hace referencia a la capacidad de estos materiales de evitar reacciones químicas desfavorables al entrar en contacto con otros materiales.
- Alto punto de fusión: deben soportar altas temperaturas (por encima de  $1000^{\circ}\text{C}$ ) sin modificar su estado.

### 2.5.3 Presentaciones

Los materiales refractarios se presentan en una variedad de formas, si bien las más frecuentes son:

Ladrillo refractario: “Estos ladrillos se utilizan en la construcción de hornos industriales, revestimientos de chimeneas y cualquier estructura sometida a altas temperaturas. Su capacidad para resistir el calor intenso y las fluctuaciones térmicas los hace indispensables en entornos donde se manejan altas temperaturas, como fundiciones y plantas siderúrgicas” (Control\_Web, 2024)



Concreto refractario: “Estos concretos son esenciales en la construcción de hornos industriales y revestimientos de paredes sometidos a altas temperaturas. Proporcionan resistencia estructural y aislamiento térmico, contribuyendo a la eficiencia y durabilidad de las instalaciones industriales” (Control\_Web, 2024)

## 2.6 Diseño CAD/CAE

El diseño asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés, computer-aided design) consiste en la aplicación de software especializado para la creación y modificación de modelos 3D de piezas, objetos o sistemas existentes. Ayuda a aumentar la productividad de los diseñadores, pues al trabajar en un entorno virtual es posible realizar diversos cambios y modificaciones de una manera rápida. Esto se traduce en un aumento en la calidad de los trabajos y una comunicación más efectiva con todos los involucrados.

Mediante estas herramientas es posible generar diseños tanto en 2D como en 3D. En los diseños 2D generalmente se realizan planos, dibujos mientras que en diseños 3D se trata de representaciones virtuales de productos/instalaciones.

La ingeniería asistida por computadora (CAE) consiste en la aplicación de software para simular el comportamiento que tendrá un diseño en funcionamiento con el fin de realizar modificaciones que permitan mejorar el rendimiento de estos.

“Un proceso CAE típico comprende pasos de preprocesamiento, resolución y posprocesamiento. En la fase de preprocesamiento, los ingenieros modelan la geometría (o una representación del sistema) y las propiedades físicas del diseño, así como el entorno, en forma de cargas o restricciones aplicadas. A continuación, el modelo se resuelve utilizando una formulación matemática apropiada de la física subyacente. En la fase de posprocesamiento, los resultados se presentan al ingeniero para su revisión”. (Siemens, s. f.)



## 2.7 Calor

El calor se define como una transferencia de energía térmica entre dos cuerpos a diferentes temperaturas. Siempre fluirá desde el cuerpo con mayor temperatura hacia el cuerpo con menor temperatura.

Todos los objetos y seres existentes están formados por átomos y moléculas que están siempre en movimiento, incluso en materiales que parecen estar en reposo a simple vista. La energía asociada al movimiento de estas partículas se denomina energía cinética. A medida que aumenta la energía cinética de las partículas, aumenta la temperatura del cuerpo correspondiente.

La temperatura solo es una magnitud promedio de la energía cinética de las partículas que posee un cuerpo. Cuando dos objetos a diferentes temperaturas entran en contacto, se produce un flujo de calor entre ellos hasta que alcanzan el equilibrio térmico.

### 2.7.1 Medios de transferencia

El calor puede transmitirse de tres formas diferentes:

#### 2.7.1.1 Conducción:

El calor se transmite a través de un material sólido o cuando dos objetos distintos entran en contacto. Esta transferencia ocurre entre las partículas que constituyen los objetos, las cuales deben estar a diferente temperatura para que exista dicha transferencia.

Un ejemplo común es cuando se coloca una sartén sobre una estufa; al intentar agarrar el mango, se percibe que está más caliente que cuando fue colocada inicialmente.

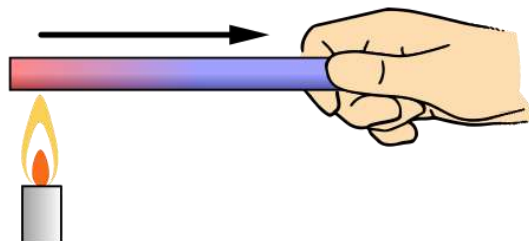


Imagen 4 WIKIMEDIA COMMONS. (2022). Conducción. Recuperado de <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Heat-conduction.svg>

### 2.7.1.2 Convección:

La transferencia de calor a través de un líquido o gas dentro del espacio donde se encuentra. Esta puede ocurrir de dos formas:

- Natural: no requiere de elementos externos y es producida únicamente por la diferencia de densidades del fluido.
- Forzada: el fluido es obligado a moverse mediante el uso de algún elemento externo, como un ventilador.

Un ejemplo claro de esto se observa al colocar una olla con agua sobre una estufa. El calor transferido a la olla comienza a calentar las partículas de agua que se encuentran en contacto directo con el fondo de la olla. A medida que esta se calienta, el líquido caliente asciende dentro del recipiente, mientras que el líquido más frío desciende, iniciando así un ciclo de transferencia de calor dentro del líquido.



Imagen 5 UNIVISION. (2022). Convección. Recuperado de <https://www.univision.com/explora/que-es-la-conveccion>

### 2.7.1.3 Radiación:

“La radiación térmica se produce cuando el calor se transfiere en forma de ondas electromagnéticas, sin necesidad de un medio material para su propagación” (NUTEC, s. f.). Todo cuerpo es capaz de emitir esta radiación, sin embargo, su intensidad dependerá de la longitud de onda y la temperatura. Dado que no necesita de un medio de propagación puede incluso ocurrir en el vacío.

El ejemplo cotidiano es el Sol, incluso al estar a miles de kilómetros de la tierra, es capaz de enviar grandes cantidades de luz y calor a través de ondas electromagnéticas.

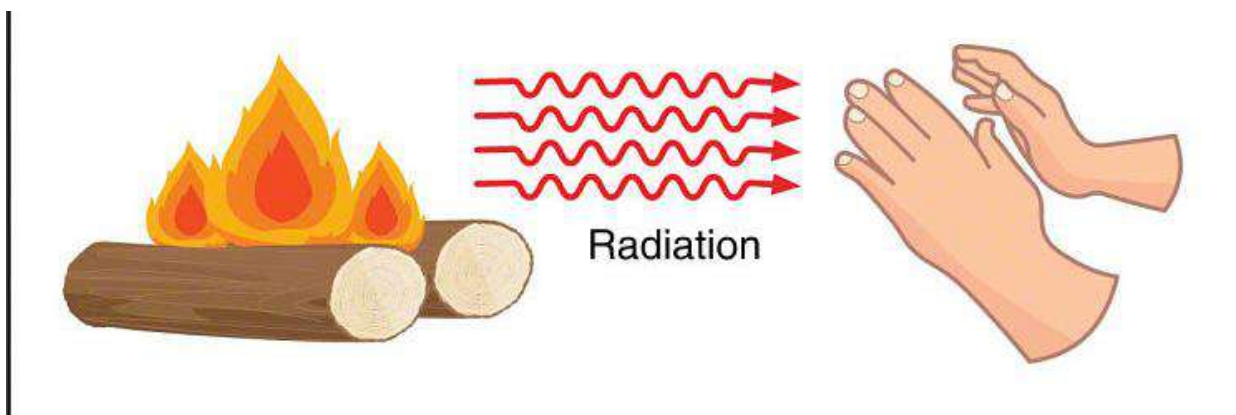


Imagen 6 IQR. (2022). Radiación. Recuperado de <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2021/03/principios-basicos-de-transferencia-de.html>

## 2.8 Conductividad térmica

Se trata de una propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducir calor. Cuanto mayor sea este valor, el material será un mejor conductor de calor (como ocurre en los metales) mientras que cuanto más baja sea, el material será un aislante de calor (como los materiales aislantes).

Sus unidades en el SI (Sistema Internacional) son el  $W/m K$  y se trata de la inversa de la resistencia térmica (la capacidad de un objeto de resistir la transferencia de calor).



La conductividad térmica de un objeto varía con la temperatura. Como se sabe, el calor se genera por el movimiento de las partículas, por lo tanto, a temperaturas más altas, estas se mueven con mayor rapidez, lo que resulta en una transferencia de calor más rápida. Por tanto, es crucial operar un elemento dentro de los rangos de temperatura adecuados para evitar posibles fallos productos del estrés térmico.

## 2.9 Densidad

Se refiere a la cantidad de masa de un objeto por unidad de volumen. Se representa mediante la letra griega rho ( $\rho$ ). En el SI sus unidades son el  $\text{Kg/m}^3$ . Esta puede calcularse mediante la siguiente formula:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad \text{donde: } m = \text{masa}, v = \text{volumen}$$

Este concepto puede apreciarse al comparar dos objetos de diferente material, pero de mismo “peso”, por ejemplo, una esfera de acero de 1kg será más pequeña que una bola de estambre de 1kg, debido a la alta densidad de los metales.

La densidad de algunos materiales:

- Magnesio (Mg). 1,738 g/cm<sup>3</sup>
- Calcio (Ca). 1,54 g/cm<sup>3</sup>
- Hierro (Fe). 7,874 g/cm<sup>3</sup>
- Plata (Ag). 10,5 g/cm<sup>3</sup>
- Oro (Au). 19,3 g/cm<sup>3</sup>
- Agua (H<sub>2</sub>O). 1 g/cm<sup>3</sup>
- Aceite. 0,92 g/cm<sup>3</sup>
- Aire. 1,225 kg/m<sup>3</sup>

## 2.10 Chapa metálica

Se refiere a la carcasa metálica del horno, que sirve para contener el recubrimiento interno y el material a tratar. Además, funciona como soporte ante los esfuerzos que se producen debido a la temperatura interna.



## 2.11 Quemador

Se trata de dispositivos que producen una llama mediante la combustión de un combustible, con el fin de calentar algún objeto o sustancia. Son uno de los componentes fundamentales en un horno

## 2.12 Anclas

Se trata de elementos utilizados para brindar soporte adicional a las instalaciones refractarias. Estas son fabricadas de metal o material refractario y se pueden instalar en las paredes y techo de la instalación.

En caso de formarse grietas en el recubrimiento, estas anclas sirven para evitar la propagación de estas por toda la superficie, además, en caso de desprendimiento, estas evitan la caída total del recubrimiento, lo que reduce los efectos negativos.

### Materiales:

Estas anclas pueden fabricarse de dos diferentes materiales:

**Metálicas:** fabricadas de diferentes tipos de acero, estas anclas deben tener una longitud de  $\frac{2}{3}$  del espesor total del ancho del recubrimiento, con el fin de evitar daños en el ancla producto de estar en contacto directo con altas temperaturas.

**Refractarias:** fabricadas de material refractario, estas anclas cuentan con un herraje metálico interno que les brinda soporte. Pueden tener la misma longitud que el ancho total del recubrimiento y son capaces de soportar las mismas condiciones a las que se encuentra sometido el material refractario de la pared.

### Instalación

Ambos tipos de anclas deben ser sujetas a la carcasa metálica, esto mediante la soldadura de la propia ancla (en caso de anclas metálicas) o mediante la soldadura del herraje (para anclas refractarias). En el caso de las anclas metálicas, estas deben seguir un patrón diferente en cada una, para que se evite la fractura o la propagación de esta.



## Forma

Las anclas metálicas pueden tener una variedad amplia de formas, sin embargo, las más utilizadas son aquellas con forma de “V” o “Y” con ondas en sus extremos. Las anclas cerámicas tienen forma de prisma rectangular con cortes transversales que evitan la propagación sencilla del calor.

### **2.13 Análisis térmico**

Es un tipo de análisis que ayuda a observar el comportamiento de materiales sometidos a cargas térmicas. Cuando un material aumenta o disminuye su temperatura, tiende a sufrir cambios en su estructura, que pueden ir desde un aumento en su volumen hasta la fusión.

Además de esto, este análisis ayuda a determinar las temperaturas teóricas que se alcanzarán en un horno, sirviendo como referencia para especificaciones técnicas de diseño.

### **2.14 Endoscopia**

“La endoscopia es un procedimiento de inspección, usando en la industria del vidrio, la cerámica, el acero, cemento y demás, que está diseñado para explorar en hornos cuyas temperaturas alcanzan hasta 1700°C”. (Saint-Gobain, s. f.)

### **2.15 Alúmina**

La alúmina es un compuesto químico ampliamente utilizado en diversas aplicaciones industriales. Se trata de óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) que pertenece al grupo de los cerámicos y se encuentra forma natural como mineral (corindón). Este añade resistencia mecánica y aumenta la temperatura máxima de trabajo en el material al que se agrega.



Según la clasificación MOHS, el corindón tiene un valor de 9, lo que indica que este mineral tiene una alta dureza. Además, tiene un punto de fusión bastante elevado, superior a los 2000 °C.

Entre sus propiedades se encuentran

- Densidad: 3,86-4,05 g/cm<sup>3</sup>.
- Dureza Vickers: 1500-1650 kgf mm<sup>2</sup>.
- Módulo de elasticidad: 300-400 GPa.
- Coeficiente de Poisson: 0.27
- Resistencia mecánica a la flexión: 275 - 550 MPa
- Tenacidad a fractura (K<sub>Ic</sub>): 3.0 - 5.3 MPa·m<sup>1/2</sup>
- Baja conductividad eléctrica: 10<sup>15</sup> Ω\*cm

La alúmina se utiliza principalmente en la fabricación de revestimientos para hornos industriales, aunque también tiene aplicaciones en la industria aeroespacial y en industrias de alta temperatura.



## CAPÍTULO III. DESARROLLO

En este capítulo se presenta la metodología empleada en el proceso de rediseño de los diferentes hornos solicitados por los usuarios. Se tratan diversos puntos como son; el modelado 3D, el cálculo del material necesario para la construcción de los hornos, así como la evaluación de su rendimiento térmico.

Finalmente, se elaboran propuestas de diseño o rediseño (según sea el caso) de los hornos, las cuales contienen los hallazgos obtenidos a lo largo de este proceso, presentados mediante diversos planos y memorias de cálculo. Al finalizar se realiza un análisis destacando los beneficios y ventajas que ofrecen las propuestas realizadas frente al diseño actual en términos de ahorro, durabilidad y cumplimiento de los requerimientos del cliente.

Este enfoque metodológico se desarrolla con el propósito de asegurar que la propuesta resultante brinde confianza a los clientes.

### 3.1 Selección de materiales

#### 3.1.1 Determinación de espesor

El espesor de las capas que conforman el recubrimiento técnico se determina en función de diversos factores:

- **Levantamiento técnico**

Mediante un levantamiento técnico se obtiene el espesor de las capas aislantes que se utilizan en el proceso de diseño y construcción del horno. Este espesor ha sido definido con base en las características del diseño.

- **Capacidad volumétrica**

Es necesario conocer la cantidad de material fundido que el horno puede contener en su interior. Si la capacidad actual es menor a la inicial, es posible reducir el espesor para aumentar la eficacia del horno.

- **Análisis térmico**

La temperatura en la cara fría es un punto importante al realizar un rediseño de horno; es necesario realizar un análisis que permita identificar si el espesor por utilizar permite una adecuada contención de calor.

Se debe evaluar el resultado obtenido para garantizar que las interacciones entre el calor y los materiales no provoquen fallas críticas en la instalación.

### 3.1.2 Concreto refractarios

#### 3.1.2.1 % de alúmina

La cantidad de alúmina que se encuentre en un concreto refractario determina su capacidad de oponerse al flujo de calor. Esto significa que, a mayor porcentaje, menor será la transferencia de calor y viceversa.

Los concretos refractarios cuyo componente principal la alúmina, demuestran tener una mayor eficiencia y rendimiento térmico comparado con materiales con una base química diferente.

Partiendo de lo anterior, para el desarrollo de este proyecto se utilizan los materiales que se muestran en la siguiente tabla:

*Tabla 1 Porcentaje de alúmina en concretos*

| Material                        | % de alúmina |
|---------------------------------|--------------|
| Concreto refractario de trabajo | 60           |
| Concreto refractario de soporte | 50           |

#### 3.1.2.2 Concreto de trabajo

Este se coloca en contacto directo con el material fundido contenido al interior del horno, se utiliza uno con 60% de alúmina para reducir de manera significativa la temperatura que se tendrá en capas más alejadas del interior. El alto contenido de

alúmina le otorga una gran resistencia mecánica, la cual es necesaria para soportar los esfuerzos producidos por el material líquido.

### 3.1.2.3 Concreto de soporte

Su principal función es la brindar soporte estructural al horno a la vez que reduce aún más la temperatura en las demás capas. Este puede utilizarse en zonas que no se encuentren en contacto directo con material fundido. Se opta por utilizar un concreto con 50% de alúmina.

### 3.1.2.4 Tecnología

- Liga hidráulica

Los concretos refractarios de liga hidráulica son aquellos en los que la solidificación se produce a temperatura ambiente mediante un proceso de hidratación. Se trata de concretos densos que se obtienen al mezclar cemento con agua. La mezcla resultante se coloca en el área deseada para formar las paredes del horno, las cuales se vuelven rígidas gracias a la liga hidráulica.

Al entrar en contacto el agua con el cemento, se producen hidratos en la mezcla; estos se volverán más densos conforme se realice el proceso de secado y aumentarán la porosidad de la pieza. Se debe tener especial cuidado con la cantidad de agua que se añade, ya que esta define en gran medida las propiedades finales que posera el refractario al solidificarse.

La aplicación de estos concretos refractarios se realiza de diversas maneras dependiendo el contexto de la instalación: mediante colado, bombeado, vibrado de la mezcla o bombeado húmedo (shotcrete). Una vez colocados, estos materiales se vuelven rígidos y requieren un proceso de secado posterior.

El secado es un paso importante que no puede ser acelerado; es necesario eliminar el agua antes de someter la estructura a altas temperaturas. Este proceso de secado permite que el agua se evapore y salga a través de los poros formados en



el material. Cuanto más ancha sea la pared del horno, mayor será el tiempo necesario para completar el secado.

Un calentamiento abrupto puede provocar daños serios en la estructura, ya que podría generar una presión interna que puede reventar la pared y provocar la destrucción del refractario. Por ello, es importante seguir un calentamiento gradual para asegurar la integridad estructural.

- Liga química

Son concretos refractarios cuyo fraguado se produce mediante reacciones químicas que ocurren a temperatura ambiente. Estas reacciones provocan la unión de átomos e iones con la finalidad de formar moléculas o cristales. Esta formación se realiza con la ayuda de aditivos específicos que se endurecen a temperatura ambiente, proporcionando alta integridad estructural sin la necesidad de sinterización a altas temperaturas.

Una ventaja significativa de estos concretos es la variedad de métodos disponibles para modificar el enlace químico, lo que permite desarrollar nuevas composiciones capaces de resistir una amplia variedad de entornos severos según las necesidades del proceso realizado.

Además, estos concretos poseen una excelente capacidad de adherencia a otros materiales refractarios utilizados dentro de la misma instalación, evitando así los problemas derivados de uniones débiles entre materiales. Este aspecto es crucial para mantener la integridad estructural y funcional del sistema en el que se aplican.

En cuanto a su resistencia, estos concretos ofrecen una gran resistencia a la abrasión, lo que los hace ideales para aplicaciones donde el desgaste es un problema constante. La instalación de estos concretos se realiza mediante varios métodos como colado, bombeo y bombeo húmedo (shotcrete), permitiendo adaptar el método de aplicación al contexto donde se sitúe el horno.

### 3.1.2.5 Selección de tecnología

Los resultados obtenidos de la investigación se muestran en la siguiente tabla:

*Tabla 2 Comparación de ligas*

| LIGA HIDRÁULICA                         | LIGA QUÍMICA                       |
|-----------------------------------------|------------------------------------|
| Menor tiempo de almacenamiento          | Mayor tiempo de almacenamiento     |
| Menor dureza                            | Mayor dureza                       |
| Variedad de métodos de instalación      | Variedad de métodos de instalación |
| Mayor tiempo de fraguado                | Menor tiempo de fraguado           |
| Resistencia a la abrasión               | Resistencia a la abrasión          |
| No requiere aditivos adicionales        | Requiere de aditivos adicionales   |
| Menor capacidad de adherencia           | Alta capacidad de adherencia       |
| Proceso de calentamiento más controlado | Proceso de calentado más rápido    |

Se opta por utilizar un concreto refractario de liga química, esto debido a la superioridad del material en comparación con el otro.

Dentro de los concretos de liga química existen 3 tecnologías disponibles:

- Fosfórica

Durante la fabricación de estos concretos refractarios, se añaden ácidos fosfóricos que actúan como aglutinantes. Estos ácidos reaccionan con la alúmina presente en la mezcla, incrementando la resistencia del material a altas temperaturas. Este tipo de liga se utiliza principalmente en la formación de materiales que requieren una alta resistencia a la abrasión y donde la baja conductividad térmica no es una prioridad.

El fraguado de este tipo de concreto es más rápido en comparación con otros. Esto permite que el material adquiera rápidamente la dureza y estabilidad necesarias para soportar las condiciones extremas a las que será sometido.



- Silica coloidal

Se trata de un compuesto formado por partículas de sílice amorfa suspendidas en un medio líquido. Este se utiliza para mejorar la fuerza y durabilidad del material refractario, además de brindarle mejor soporte estructural, permitiendo que el material resista fácilmente el choque térmico y la erosión.

Para garantizar la conservación del material, este debe ser almacenado en condiciones ambientales adecuadas, evitando así cualquier daño que pudiera comprometer sus propiedades. Se trata de una tecnología de alto rendimiento y eficiencia, la cual facilita la instalación del concreto al mejorar su fluidez y trabajabilidad, permitiendo la creación de formas más complejas.

El concreto aumenta su densidad al reducir los vacíos entre las partículas, disminuyendo así la porosidad, reduciendo así la transferencia de calor y, por ende, disminuyendo su conductividad térmica.

- Sol-gel

Se trata de la formación de un material refractario a partir de moléculas. Se comienza con la formación inicial de una suspensión coloidal (sol) que se convierte en una malla porosa tridimensional interconectada capaz de expandirse. Esta técnica permite la fabricación de concretos refractarios sin necesidad de utilizar cemento como ligante, eliminando así el uso de agua por completo.

Esta nueva estructura aporta mejoras significativas en las propiedades del material refractario, destacando una mayor resistencia a la compresión, alta resistencia al choque térmico y una excelente resistencia al ataque químico. Además, estos materiales tienen una mejor interacción con el material fundido, reduciendo significativamente el deterioro de la estructura, alargando así la vida útil del refractario y facilitando su aplicación en diversas situaciones industriales.

Los concretos refractarios de esta categoría son ideales para instalaciones en las que no es posible implementar un proceso de calentamiento y/o secado controlado.

Utilizando la información anterior, se tiene la siguiente tabla comparativa de las ventajas de cada tecnología:

*Tabla 3 Comparación entre tecnologías*

| FOSFÓRICA                      | SILICA COLOIDAL               | SOL-GEL                             |
|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| Aumento de resistencia térmica | Mayor fuerza                  | Proceso de fraguado menos estricto  |
| Alta resistencia a la abrasión | Mayor durabilidad             | Resistencia al deterioro            |
| Conductividad térmica elevada  | Mejor soporte estructural     | Eliminación de cemento como ligante |
| Fraguado rápido                | Resistencia al choque térmico | Eliminación de uso de agua          |
|                                | Resistencia a la erosión      | Resistencia a la abrasión           |
|                                | Almacenaje controlado         | Mayor tiempo de almacenamiento      |
|                                | Fácil instalación             | Mayor vida útil                     |
|                                | Mayor densidad                | Fácil instalación                   |
|                                | Baja transferencia de calor   | Resistencia a la compresión         |
|                                |                               | Resistencia al choque térmico       |
|                                |                               | Resistencia a ataque químico        |

Con base en las ventajas y características ofrecidas por cada tecnología, se opta por utilizar sílice coloidal. Esto se debe a que sus propiedades se adaptan mejor a las necesidades del proyecto, además de la “facilidad” de obtención de este tipo de material en comparación con los otros.

### 3.1.2.6 Peso

Este factor es clave al momento de seleccionar un material. Generalmente los materiales utilizados en la construcción de hornos son demasiado densos, por lo que siempre se requerirá usar grandes cantidades de material.

Una pared con un gran peso puede representar un problema serio para la instalación. Si excede la capacidad de carga del anclaje, podría provocar deformaciones en la carcasa metálica derivado del esfuerzo producido por la pared. Sin embargo, una pared con un peso pequeño también representa problemas:

podría no ser capaz de soportar los esfuerzos producidos por el material fundido, lo que podría llevar a que se fracture.

Para evitar estos errores, es necesario seleccionar un material que tenga una densidad promedio, es decir, ni muy elevada ni muy baja. Esto garantiza la viabilidad del proyecto y permite una mejor adaptación del material al desarrollo de este.

En la siguiente tabla se muestra la densidad de algunos de los concretos más utilizados en la fabricación de hornos.

*Tabla 4 Densidades de algunos concretos*

| MATERIAL               | DENSIDAD (KG/M <sup>3</sup> ) |
|------------------------|-------------------------------|
| Concreto 1 15%         | 2000                          |
| Concreto 2             | 2210                          |
| Concreto 3 50% alúmina | 2400                          |
| Concreto 4 60% alúmina | 2510                          |
| Concreto 5             | 2590                          |
| Concreto 6             | 2660                          |
| Concreto 7             | 2840                          |

Basándose en las densidades anteriores, se eligen el concreto 4, el cual cuenta con una densidad de 2510 kg/m<sup>3</sup> y el concreto 3 con una densidad de 2400 kg/m<sup>3</sup>.

### 3.1.2.7 Cantidad

La cantidad de material dependerá también del valor de la densidad, un refractario con menor densidad se traduce en una menor cantidad de material necesaria para construir una sección y viceversa.

### 3.1.2.8 Costo

Existe una diferencia notable entre las dos principales ligas de concreto:

- El concreto de liga química tiene un valor aproximado de 60–75% mayor que el de liga hidráulica
- El concreto de liga hidráulica tiene un costo aproximadamente 40% mayor que los materiales aislantes.

Al seleccionar un concreto de liga química, se tendrá que desembolsar una cantidad monetaria considerable, sin embargo, esto debe verse como una inversión, ya que el concreto seleccionado es superior a las alternativas existentes en el mercado.

### 3.1.2.9 Análisis térmico

Se realiza un análisis térmico a algunos materiales que se utilizan comúnmente en la construcción de hornos (Tabla 4) mediante software CAD a una placa rectangular de 50\*50\*5 cm y una temperatura de 1000°C.

CONCRETO 1 (15% ALÚMINA)

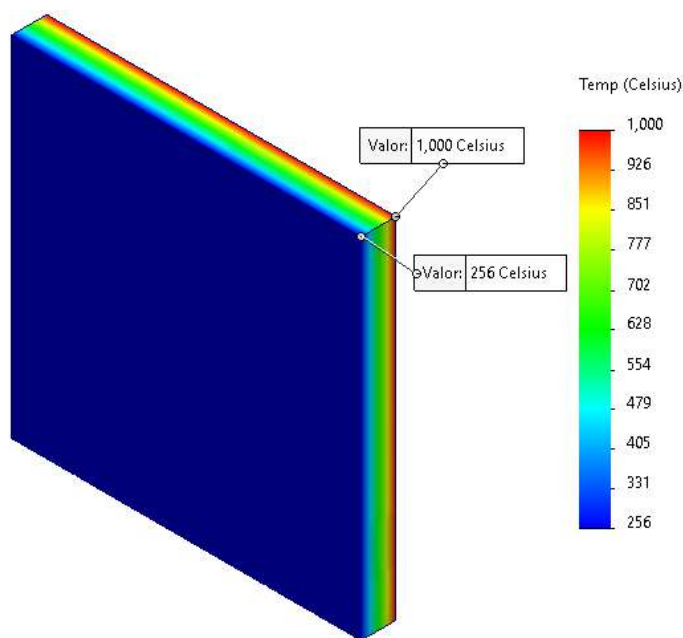


Imagen 7 Resultados Concreto 1. Elaboración propia

## CONCRETO 2 (60% ALÚMINA)

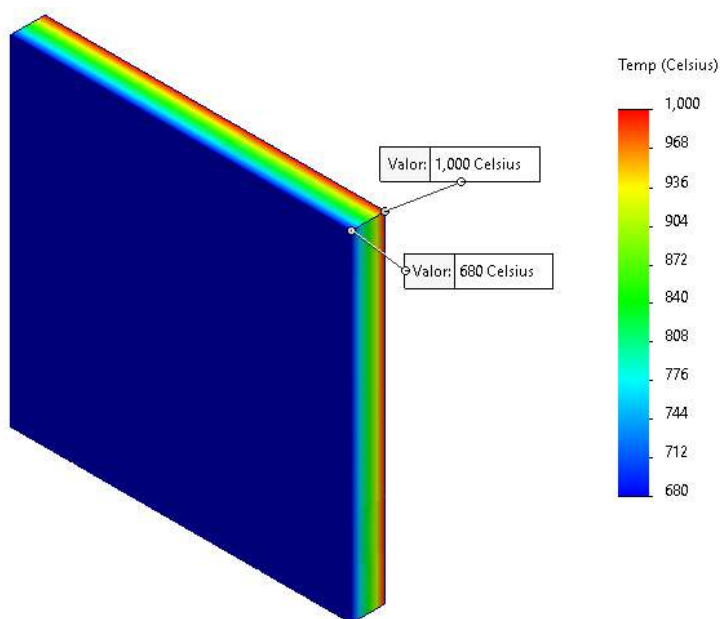


Imagen 8 Resultados Concreto 2. Elaboración propia

## CONCRETO 3 (44% ALÚMINA)

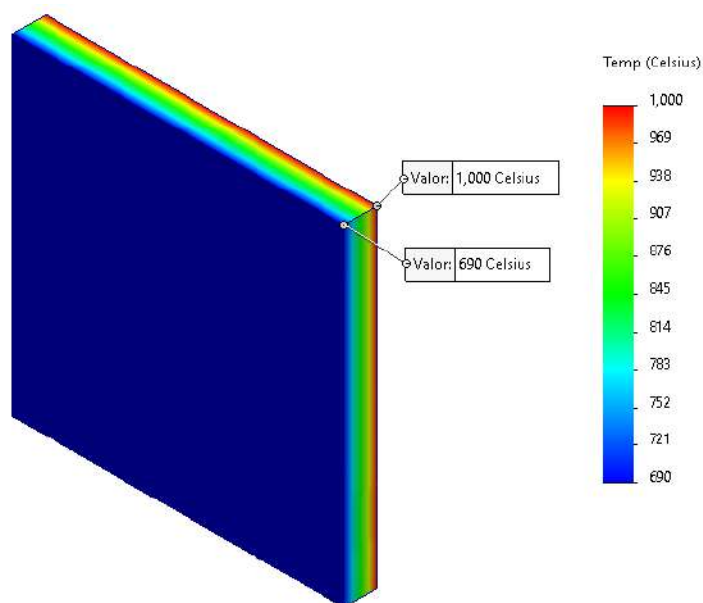


Imagen 9 Resultados Concreto 3. Elaboración propia

## CONCRETO 4 (60% ALÚMINA)

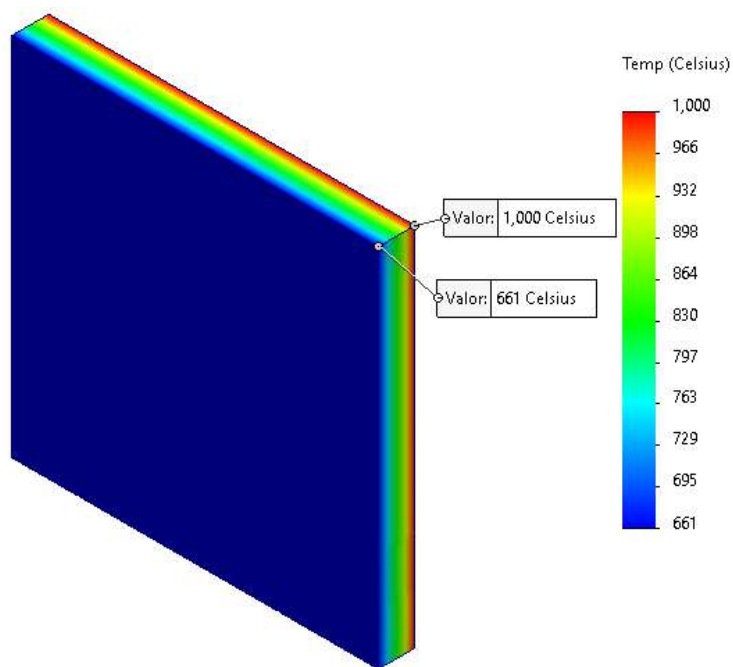


Imagen 10 Resultados Concreto 4. Elaboración propia

## CONCRETO 5 (88% ALÚMINA)

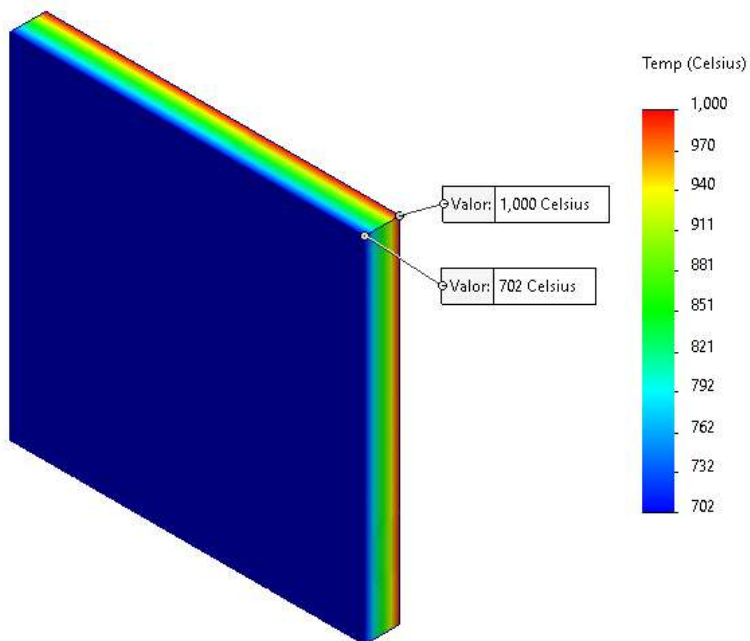


Imagen 11 Resultados Concreto 5. Elaboración propia

## CONCRETO 6 (65% ALÚMINA)

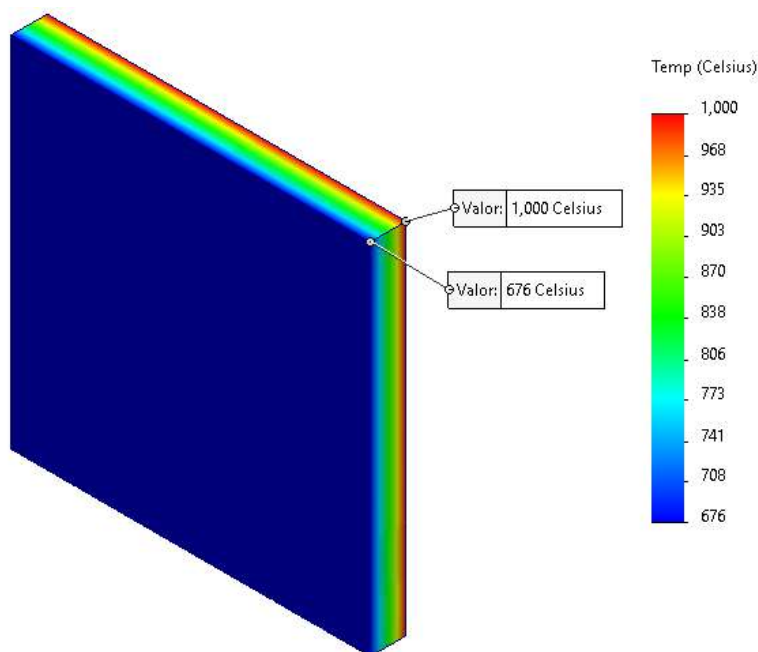


Imagen 12 Resultados Concreto 6. Elaboración propia

Se aprecia que existen diferencias considerables entre concretos, en caso del concreto seleccionado (concreto 4) se observa que se obtienen resultados favorables respecto a la temperatura en cara fría, además, considerando sus propiedades físicas, lo vuelven la mejor opción para el desarrollo de los hornos.

### 3.1.3 Aislantes térmicos

#### 3.1.3.1 Rango de temperatura

Es importante considerar la temperatura de trabajo en la cual el aislante puede funcionar sin sufrir daños en su estructura. Esta temperatura depende del proceso que se realice, además del tipo de horno y las condiciones que se utilicen. Se debe tener especial cuidado con estos rangos de temperatura, pues una mala elección puede provocar la destrucción del aislante, generando daños críticos en el horno y los equipos circundantes. Dentro de los rangos de temperatura que es necesario conocer se encuentran:

- Temperatura de clasificación

La máxima temperatura que puede soportar un aislante de manera no continua. Es decir, el límite de temperatura que soporta el material.

- Temperatura de uso continuo

Se refiere a la temperatura a la que el aislante puede trabajar de manera constante sin presentar fallas en el mismo.

### 3.1.3.2 % químico

Los compuestos químicos que conforman los aislantes térmicos determinan las propiedades físicas y térmicas que estos tendrán. En la siguiente tabla se muestran los compuestos más utilizados en la fabricación de aislantes:

*Tabla 5 Contenido químico en aislantes.*

| MATERIAL | FORMULA                 |
|----------|-------------------------|
| Alúmina  | $\text{Al}_2\text{O}_3$ |
| Silica   | $\text{SiO}_2$          |
| Calcio   | $\text{CaO}$            |
| Magnesia | $\text{MgO}$            |

Se opta por usar aislantes térmicos cuyo elemento principal sea alúmina o sílice.

### 3.1.3.3 Cantidad

A diferencia de los concretos, los aislantes tienen su presentación en piezas solidas listas para instalar, sin necesidad de realizar pasos adicionales. El número de piezas que se requieren para un proyecto depende de la densidad que posea un aislante térmico; un material con mayor densidad requerirá de mayor cantidad para llenar un espacio determinado.

Para el desarrollo de los hornos en este proyecto, se seleccionan materiales que posean una densidad de entre 250-300  $\text{Kg/m}^3$



### 3.1.3.4 Conductividad térmica

El objetivo principal de utilizar aislantes térmicos es el de reducir al mínimo la transferencia de calor entre las paredes refractarias y la carcasa metálica, para proteger los elementos externos y garantizar el correcto funcionamiento del equipo. A diferencia de los concretos refractarios, es crucial que el material seleccionado posea una conductividad térmica realmente baja, con valores inferiores a  $0.5 \text{ W/m K}$ .

En el desarrollo de este proyecto se utilizan materiales que posean una conductividad térmica inferior a  $0.3 \text{ W/m K}$ .

### 3.1.3.5 Tecnología

Los aislantes térmicos son fabricados utilizando diversas tecnologías que les otorgan características específicas. Las que son utilizadas con mayor frecuencia se describen a continuación:

- Lana mineral

Los materiales en cuestión se obtienen a partir de la mezcla y fundición de sílice. Están formados por un tejido de filamentos finos que retienen aire en su interior. Esta estructura permite que sean realmente ligeros en comparación con su tamaño, con una densidad inferior a  $50 \text{ kg/m}^3$ , dependiendo de la presentación específica utilizada.

Estos materiales ofrecen una excelente resistencia a temperaturas de hasta  $700^\circ\text{C}$ , siendo ideales para aplicaciones que requieren buena resistencia al calor y al fuego. Además, son químicamente inertes ante otros compuestos y poseen una notable resistencia a la corrosión, lo que les permite mantener su integridad y rendimiento en entornos químicamente agresivos.

Los materiales de lana mineral no retienen la humedad y pueden recuperar sus propiedades después de entrar en contacto con agua. Tienen una vida útil prolongada y presentan una baja conductividad térmica, inferior a  $0.040 \text{ W/m K}$ .

- Fibra cerámica

Se forman principalmente a partir de sílice y alúmina, junto con otros compuestos, destacan por su alta resistencia a temperaturas, soportando hasta 1400 °C. Estos materiales se fabrican entretejiendo fibras cerámicas largas.

Poseen una baja conductividad térmica y, además, son capaces de resistir choques térmicos y abrasión. La instalación de estos materiales es sencilla y no requiere procesos adicionales durante el montaje, lo que facilita su uso en diversas aplicaciones. A pesar de ser ligeros, estos materiales son más densos en comparación con la lana mineral, con una densidad de hasta 300 kg/m<sup>3</sup>.

- Concreto poroso

Se trata de un concreto liviano producido a partir de sílice mezclada con cemento, agua y aditivos. Durante su elaboración, se produce una reacción química que genera la expansión del concreto, formando poros dentro de la estructura. Este tipo de aislante tiene una densidad de hasta 900 kg/m<sup>3</sup>. Este concreto tiene la capacidad de soportar temperaturas elevadas de hasta 1650 °C.

- Concreto alto en calcio

Se trata de un cemento hidráulico cuya composición mayoritaria es calcio, arriba del 60%, además de óxidos de diversos compuestos químicos. Posee una alta resistencia a las temperaturas elevadas y, además, una alta resistencia a ataques químicos débiles, lo que lo hace especialmente apto para entornos altamente agresivos.

- Microporoso

Son una composición de silicatos y fibras que se presenta en forma de polvo o placas. Estos materiales tienen una estructura porosa con poros de un tamaño inferior al recorrido libre medio de las moléculas de aire a presión atmosférica estándar (10<sup>-7</sup> m). Esta característica, junto con su composición química, les



confiere una conductividad térmica extremadamente baja en comparación con otros materiales aislantes, siendo inferior a  $0.05 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ .

Estos materiales son capaces de resistir temperaturas superiores a  $1000^{\circ}\text{C}$ . Además, son relativamente ligeros, con una densidad promedio de  $300 \text{ kg/m}^3$ , lo que facilita su manejo e instalación. También poseen una alta resistencia a la compresión, lo que los hace especialmente útiles como respaldo de las paredes refractarias de los hornos, proporcionando tanto aislamiento térmico como soporte estructural.

Una ventaja significativa de estos materiales es su durabilidad: no caducan nunca y pueden almacenarse indefinidamente sin perder sus propiedades

### 3.1.3.6 Selección de tecnología

Utilizando la información consultada previamente, se realiza la siguiente tabla a manera de comparación:

Tabla 6 Comparación entre tecnologías aislantes

| LANA MINERAL                | FIBRA CERÁMICA                | CONCRETO POROSO              | CONCRETO ALTO EN CALCIO                | MICROPOROSO                      |
|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------|
| Muy ligeros                 | Ligeros                       | Peso moderado                | Peso moderado                          | Ligeros                          |
| Densidad muy baja           | Densidad baja                 | Densidad media               | Resistencia a ataques químicos débiles | Densidad baja                    |
| Hasta $700^{\circ}\text{C}$ | Hasta $1400^{\circ}\text{C}$  | Hasta $1650^{\circ}\text{C}$ |                                        | Hasta $1000^{\circ}\text{C}$     |
| Resistencia al fuego        | Resistencia al choque térmico |                              | Resistencia a altas temperaturas       | Alta durabilidad                 |
| Resistencia a corrosión     | Resistencia a la abrasión     |                              |                                        | Alta resistencia a la compresión |
| Baja conductividad térmica  | Baja conductividad térmica    |                              |                                        | Baja conductividad térmica       |

Basándose en la tabla anterior, se seleccionan materiales aislantes de fibra cerámica y microporoso, debido a la mayor variedad de ventajas ofrecidas por estos materiales.

### 3.1.3.7 Costo

Tienen un precio demasiado elevado. Los costos varían dependiendo el fabricante, sin embargo, se puede tener un factor aproximado:

- La fibra cerámica tiene un costo de 70-75% más que la lana mineral.
- El microporoso es de 3 a 4 veces más caro que la fibra cerámica

La cantidad monetaria desembolsado debe verse como una inversión, ya que los aislantes seleccionados tienen características superiores.

### 3.1.3.8 Análisis térmico

Se realiza un análisis térmico para demostrar la capacidad aislante de los materiales seleccionados. Se diseñan mediante software CAD placas de 50\*50\*5 cm, se utiliza una temperatura de 1000°C.

#### AISLANTE TÉRMICO (FIBRA CERÁMICA)

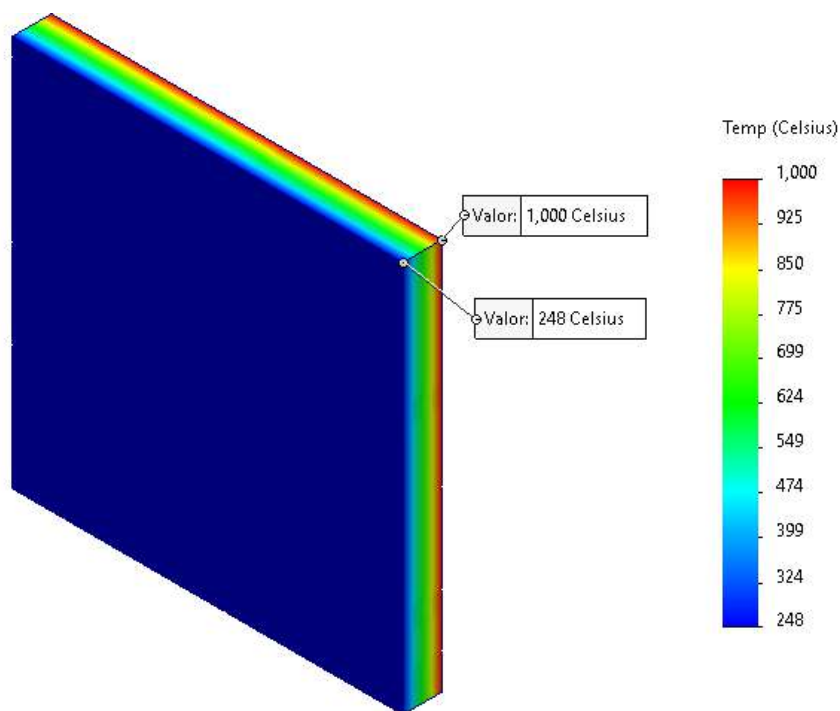


Imagen 13 Resultado de análisis a fibra cerámica. Elaboración propia

Nombre de estudio: Térmico 1(-Predeterminado-)  
Tipo de resultado: Térmico Térmico1  
Paso de tiempo: 1

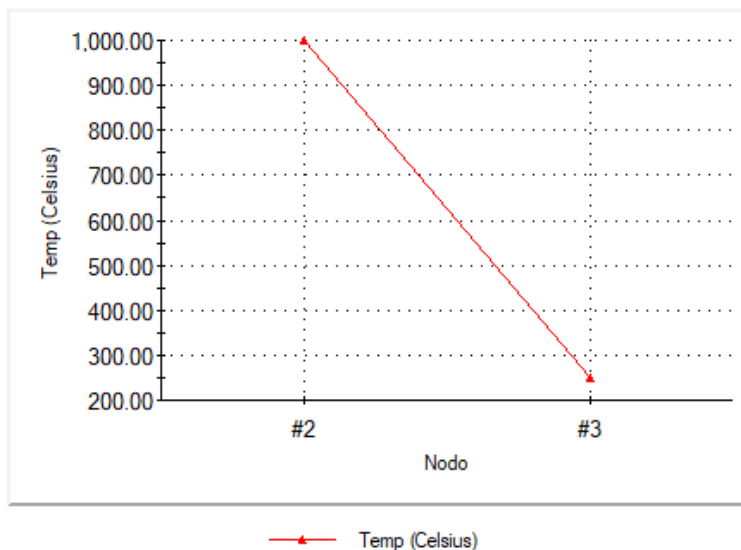


Imagen 14 Reducción de la temperatura en estado estacionario Elaboración propia

Como se puede constatar con los análisis realizados, el aislante térmico de fibra cerámica seleccionando tiene la capacidad de reducir la temperatura en un 75% aproximadamente. Estas condiciones son ideales y pueden variar con las condiciones reales, sin embargo, estas funcionan como sustento para el desarrollo de ingeniería.

## AISLANTE TÉRMICO (MICROPOROSO)

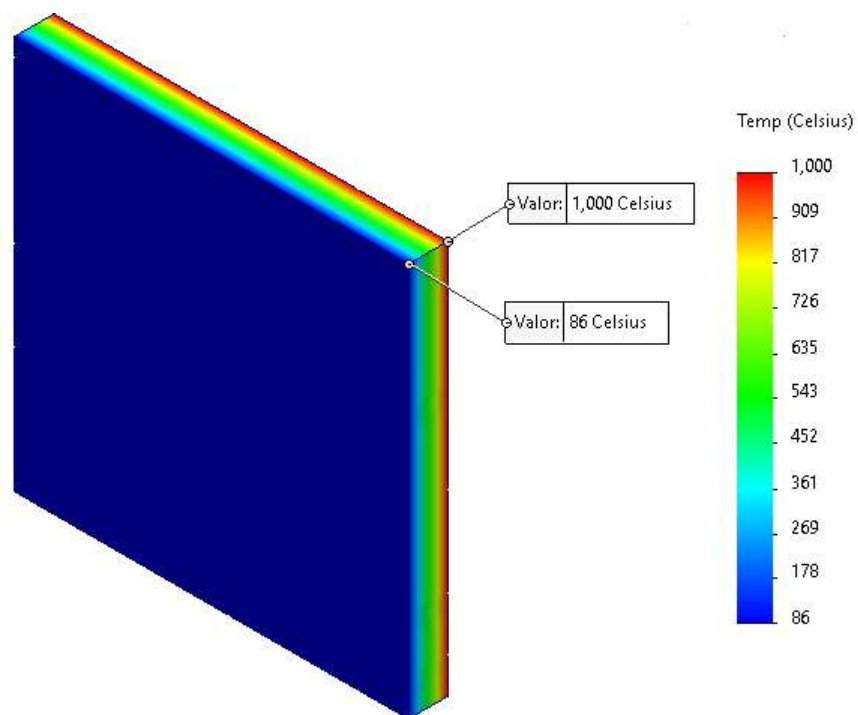


Imagen 15 Resultado de análisis a microporoso. Elaboración propia

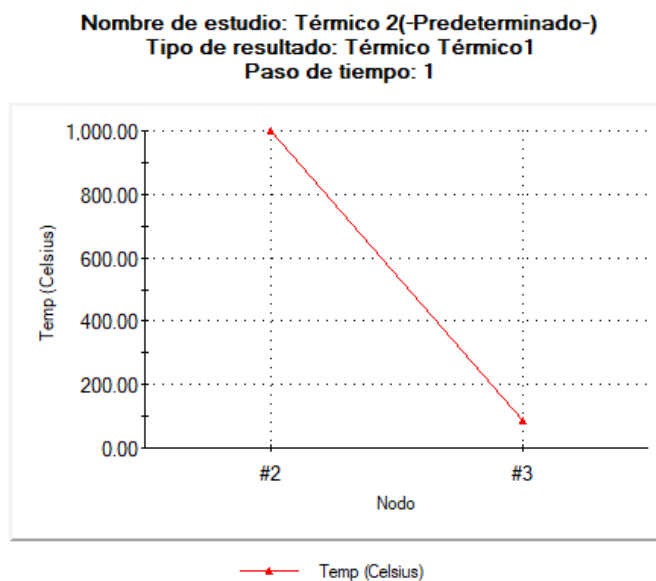


Imagen 16 Reducción de la temperatura en estado estacionario Elaboración propia

El microporoso demostró ser un material superior en cuanto a reducción de temperatura se refiere. Tiene la capacidad de reducir en un 90% aproximadamente la temperatura. Sin embargo, debido a su alto costo, este material se utilizará en casos muy específicos donde se requiera una temperatura de cara fría muy baja.

### 3.1.4 Materiales seleccionados

Los materiales seleccionados se muestran a continuación:

- CONCRETO REFRACTARIO

Se utilizarán dos concretos para el desarrollo de los diversos hornos.

*Tabla 7 Propiedades de concretos seleccionados*

|              | Concreto refractario 1   | Concreto refractario 2   |
|--------------|--------------------------|--------------------------|
| Base química | 60% contenido de alúmina | 50% contenido de alúmina |
| Liga         | Química                  | Química                  |
| Tecnología   | Silica coloidal          | Silica coloidal          |
| Densidad     | 2510 kg/m <sup>3</sup>   | 2400 kg/m <sup>3</sup>   |

- AISLANTES TÉRMICOS

Se utilizarán 2 tipos de aislantes:

*Tabla 8 Propiedades de aislantes seleccionados*

|              | Aislante 1            | Aislante 2            |
|--------------|-----------------------|-----------------------|
| Material     | Microporoso           | Fibra cerámica        |
| Base química | Alúmina               | Alúmina               |
| Densidad     | 320 kg/m <sup>3</sup> | 256 kg/m <sup>3</sup> |

## 3.2 Software de diseño

Se utiliza el software SolidWorks debido a que es una herramienta utilizada y enseñada en la institución educativa. “El software CAD SOLIDWORKS® es una aplicación de automatización de diseño mecánico que les permite a los diseñadores croquizar ideas con rapidez, experimentar con operaciones y cotas, y producir modelos y dibujos detallados” (*SOLIDWORKS, s. f.*), además, es capaz de realizar diferentes análisis que permitan predecir el comportamiento físico de un producto en el mundo real probando con modelos virtuales.

Algunos conceptos importantes para comprender el uso de este programa se muestran a continuación:

### 3.2.1 Croquis y planos

Un croquis es fundamental para iniciar cualquier operación, ya que representa el primer paso en la creación de cualquier pieza. En SolidWorks, la creación de un croquis es sencilla: solo se necesita seleccionar el plano de trabajo con que se desea trabajar, ya sea alzado (vista frontal), planta (vista superior) o lateral (vista derecha), que son los tres planos disponibles por defecto. A partir de esta selección, y utilizando las herramientas de croquizado, es posible realizar cualquier diseño.

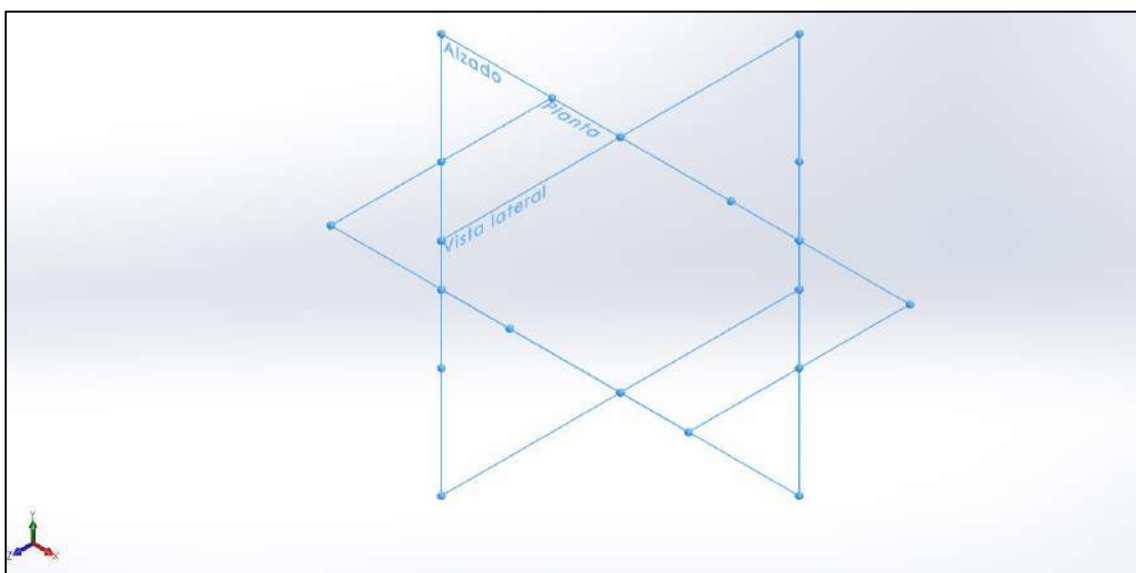


Imagen 17 Planos disponibles



### 3.2.2 Herramientas de diseño

Las herramientas en SolidWorks son funciones y comandos dentro del software diseñadas para ayudar a los diseñadores a crear, modificar y analizar modelos en 3D de manera eficiente y precisa. Estas herramientas incluyen una amplia variedad de funciones, como herramientas de dibujo, herramientas de modelado 3D, herramientas de simulación para analizar el comportamiento de los modelos, y herramientas de documentación para generar dibujos técnicos. Algunas de las herramientas más utilizadas se describen brevemente a continuación:

#### *Extruir*

La herramienta "Extruir" es esencial para crear objetos tridimensionales, ya sean figuras simples o complejas, por lo que comprender su función es de vital importancia. Esta herramienta permite la creación de superficies 3D a partir de modelos 2D. Para ello basta con seleccionar los elementos que deseados y especificar una distancia a la cual extruirlos.

#### *Cortar*

Permite eliminar material de una pieza o ensamblaje basándose en un croquis 2D o un plano. Esto es útil para analizar la geometría interna de un modelo, realizar modificaciones o crear cortes específicas para la generación de planos de dibujo.

#### *Matriz*

Esta herramienta permite crear varias copias de un croquis a lo largo de un eje lineal o circular, pudiendo definir la cantidad y la distancia entre ellas.

#### *Revolución*

Crea un sólido 3D girando un croquis cerrado alrededor de un eje predefinido.

#### *Vaciado*

Elimina el material interno de un sólido, dejando únicamente paredes delgadas con un espesor predefinido.



### 3.3 Ubicación de las capas

Es común dividir el recubrimiento interno en secciones que dependen de su ubicación con respecto al nivel de flotación. El nivel de flotación se refiere a la altura alcanzada por el material en estado líquido dentro del horno con respecto al piso.

Las paredes que se encuentran por debajo del nivel de flotación se denominan “Paredes inferiores” o “Lower Wall” y están en contacto directo con el material líquido. El conjunto de estas paredes y el piso se conoce como “Tanque del horno”.

Las paredes que se encuentran por encima del nivel de flotación se llaman “Paredes Superiores” o “Upper Wall”. Aunque estas paredes no estén en contacto con el líquido, deben ser capaces de soportar las altas temperaturas de los gases de combustión.

Existen otras denominaciones que se pueden encontrar al hablar de hornos:

1. Bóveda: se refiere a las capas de revestimiento térmico que conforman el techo (roof) del horno. Aunque referirse a esta sección como “Techo” es suficiente, utilizar una palabra u otra no influye de ninguna manera en el diseño.
2. Piso: se refiere al revestimiento horizontal inferior utilizado en el horno; en ocasiones se le identifica como “Floor”.
3. Chimenea: se refiere a los conductos por donde los gases producidos por la combustión son expulsados; normalmente esta zona tiene un recubrimiento térmico menor que el de las paredes.



## 3.4 Metodología de diseño (modelo de fases)

Se selecciona la metodología de diseño propuesta por Michael French en 1985 para el desarrollo de los hornos presentes en este proyecto. La metodología está formada por cuatro fases: análisis del problema, diseño conceptual, representación de esquemas y desarrollo de detalles. A continuación, se describe esta metodología:

### 3.4.1 Análisis del problema

Esta fase busca comprender en detalle los elementos que conforman el problema. Es necesario llevar a cabo una recopilación precisa de información con el fin de identificar el problema, considerando los recursos disponibles y las restricciones del proyecto. Este análisis permite tomar decisiones informadas para implementar las acciones necesarias que lleven a la solución completa del problema. Las acciones realizadas en esta fase son las siguientes:

#### 3.4.1.1 Obtención de información

##### 3.4.1.1.1 Análisis de planos

Poder realizar un diseño 3D adecuado no solo implica tener habilidades en el manejo de software CAD, sino también la capacidad de obtener la mayor cantidad de información posible de diversas fuentes y documentos disponibles. Los planos representan el primer paso en un proyecto, proporcionando una representación exacta en dos dimensiones de la forma de un objeto o sistema real. Estos elementos son fundamentales tanto en la fase de diseño como en su posterior construcción.

##### Interpretación de la información

Este proceso implica "traducir" la información gráfica presente en estos documentos para comprender el objeto con el que se está trabajando. Saber leer un plano de diseño implica la identificación de cotas, materiales y otras especificaciones técnicas. Además, requiere suficiente inteligencia creativa para interpretar la información sobre las diferentes secciones y vistas presentes. Una interpretación

eficiente de esta información es clave para el desarrollo correcto del proyecto de diseño.

### Obtención de medidas “ocultas”

En ocasiones, por motivos de confidencialidad, los diseñadores omiten información puntual necesaria para la construcción o modelado de equipos, como cotas que muestran ciertas medidas del equipo. Es necesario implementar estrategias para obtener esta información.

Es importante recordar que, aunque estas medidas no estén presentes explícitamente, están implícitas debido a la coherencia que el diseño debe mantener entre todas sus secciones. Una forma simple y efectiva de obtener medidas desconocidas es mediante el uso de programas de edición. Se puede utilizar un software de dibujo para obtener estos datos. El procedimiento consiste en generar un croquis en cualquiera de los planos disponibles (es indiferente para este proceso) y luego insertar una imagen de la zona del plano donde se pretende hallar una medida.

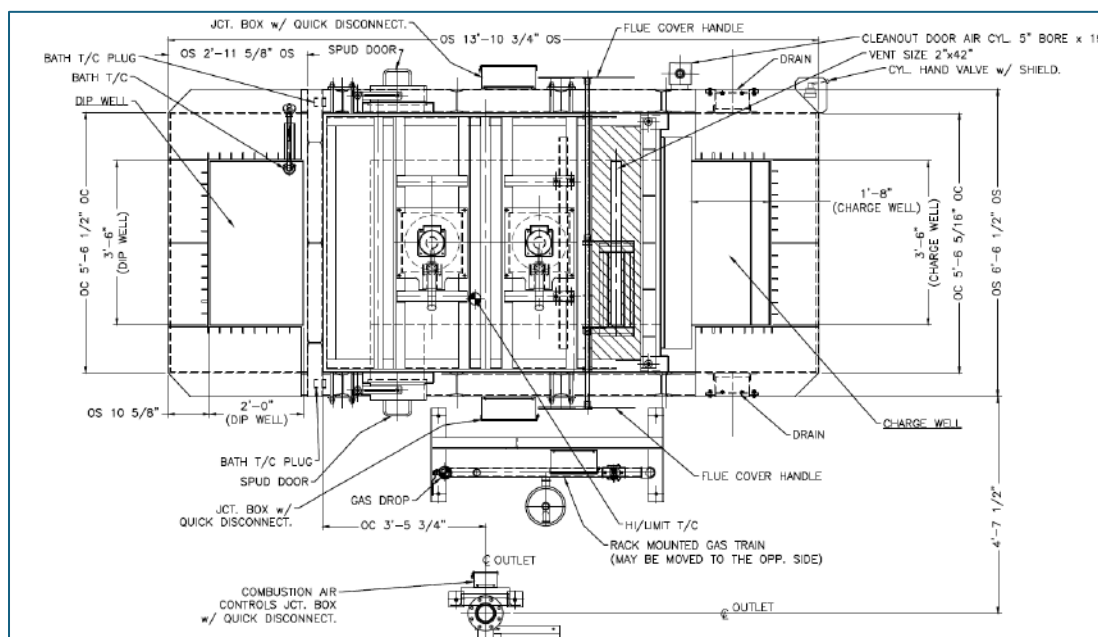


Imagen 18 Extracto de plano. Elaboración propia.

Después de insertar la imagen, es necesario "alinear" dos de las cotas utilizando líneas (una horizontal y otra vertical), de modo que tengan la misma longitud que las conocidas dentro del plano, y compartan el mismo punto de origen y final.

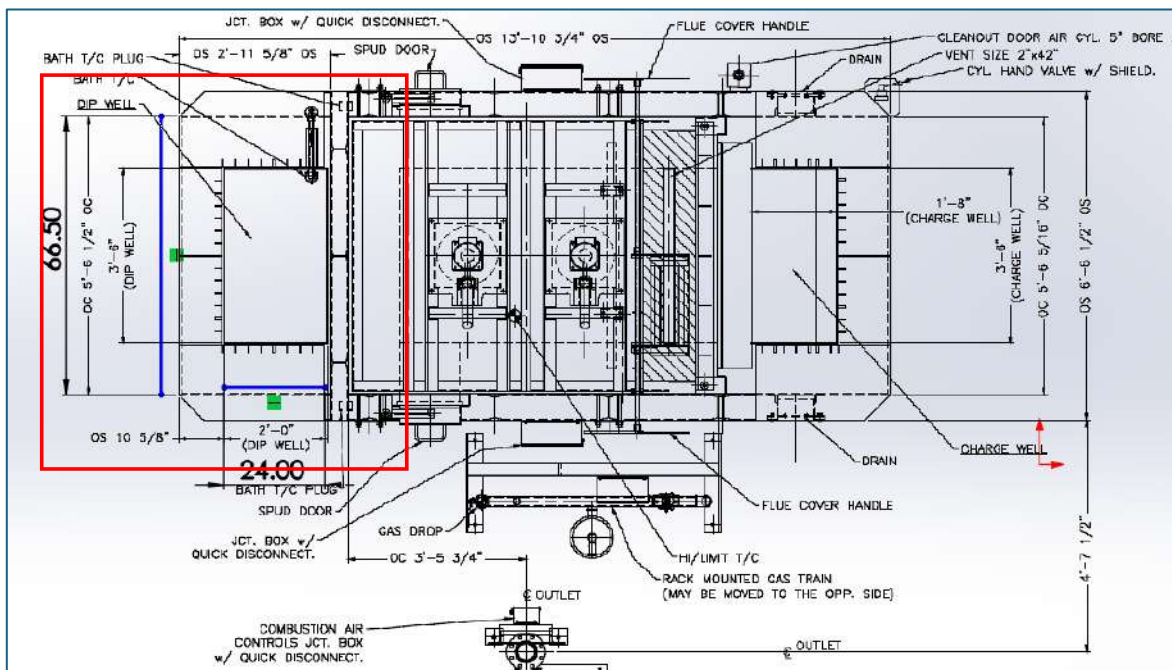


Imagen 19 Ejemplo de obtención de medidas. Elaboración propia.

Con esto es posible obtener cualquier medida necesaria y que sea útil para generar el diseño 3D, lo que garantiza realizar un diseño lo más preciso posible.

### Otras consideraciones

Los elementos relacionados con el soporte estructural (como vigas o soportes) así como los accesorios presentes (como quemadores), no se tienen en cuenta para el modelado, debido a que no aportan información crucial al proyecto.



#### 3.4.1.1.2 Levantamiento técnico

En algunas ocasiones y debido a la naturaleza del proyecto, es necesario visitar las empresas donde están instalados estos equipos. Esto representa una gran oportunidad para recopilar toda la información posible sobre el equipo y su entorno.

Es de vital importancia tomar todas las mediciones necesarias para elaborar un modelo 3D lo más preciso posible según lo encontrado en la realidad. Estas medidas deben ser registradas en una libreta o papel mediante la elaboración de un croquis, el cual no debe ser elaborado con demasiado esmero ya que se realiza rápidamente durante el levantamiento. Las herramientas que normalmente se necesitan para un levantamiento son:

- **Libreta u hojas:** es aquí donde se registran todas las medidas que se realicen, así como todas las notas que se tomen respecto al equipo (dimensiones, espesor, material, etc.) y que sirven de apoyo para la realización del modelo.
- **Lápiz o lapicero:** necesario para plasmar en el papel todas las ideas, su elección depende de la preferencia que tenga quien realice el levantamiento.
- **Flexómetro:** indispensable al realizar un levantamiento, ya que permite conocer las dimensiones reales del equipo en cuestión, debido al gran tamaño que presentan estos equipos es recomendable utilizar uno de 5 o 10m de largo, dependerá de cada persona elegir uno u otro.
- **Cámara:** permite obtener evidencia fotográfica de todo lo que se realiza, permitiendo ver las zonas que se midieron, funcionando como una medida de seguridad en caso de que se haya pasado algún dato por alto. Es recomendable tomar fotografías en las zonas más críticas y que requieran de un mayor detalle, al igual que tomar las que permitan ver en su totalidad el equipo. La forma de recopilación de información facilita la colaboración entre la empresa y los técnicos, permitiendo identificar y documentar requisitos y



consideraciones que no estén presentes en un plano. Esto asegura un desarrollo que se ajuste a los objetivos y necesidades de la empresa, y además permite identificar posibles oportunidades de mejora.

### **3.4.2 Diseño conceptual**

En esta fase se generan y exploran diversas ideas y conceptos antes de pasar a detalles técnicos específicos. Aquí se define como se resolverá el problema, estableciendo las bases a utilizar durante el desarrollo de ingeniería.

#### **3.4.2.1 Rediseño de hornos**

##### Nuevos materiales

Es bastante común que los clientes, en un intento por abaratar costos, opten por materiales más económicos. Esto no siempre da un buen resultado, ya que, al elegir las opciones más baratas, se sacrifica eficiencia y durabilidad. Invertir en materiales con propiedades mecánicas y físicas superiores puede representar un gasto elevado al inicio, pero a largo plazo se traduce en un ahorro significativo. Estos nuevos materiales pueden mejorar el rendimiento del proceso que se lleva a cabo al interior del horno, además de reducir costos de mantenimiento y prolongar la vida útil de revestimiento, volviéndose una opción más rentable.

Se propone el uso de nuevos materiales que brinden una mejora en el rendimiento del horno. Estos tienen contenido químico similar a los originales.

##### Nuevo espesor

En ocasiones, se tiende a construir un revestimiento térmico más ancho de lo necesario. En tales casos, es factible reducir este ancho para ahorrar material sin comprometer su eficiencia térmica ni su capacidad para soportar el material contenido en el tanque. Esta reducción no solo representa un ahorro monetario, sino que también aumenta significativamente la capacidad volumétrica del horno, lo que mejora la producción.

#### **3.4.2.2 Bosquejo**



La información obtenida mediante la interpretación del plano o el levantamiento técnico se utiliza para elaborar bosquejos tridimensionales que permitan visualizar la forma final del horno. Esta fase consiste en la elaboración de un modelo sólido que tenga la forma final del horno, sirviendo como una referencia visual donde se colocan todos los datos obtenidos. El objetivo principal de esto es tener una base tangible sobre la cual se sustenten las fases siguientes.

En esta fase es común tener que realizar cambios en la geometría, ya sea para añadir partes que fueron pasadas por alto al leer e interpretar el plano o para eliminar componentes que podrían causar problemas durante el modelado posterior.

Es importante no avanzar de fase hasta garantizar que este modelo es una representación confiable de lo que se tiene en la realidad, ya que un error en esta fase puede implicar un mayor error en fases más avanzadas.

### **3.4.3 Esquemas seleccionados**

Se eligen las propuestas que sean más prometedoras y se representan mediante modelos 3D realizados en software de diseño CAD. En esta fase se realizan las siguientes acciones:

#### **3.4.3.1 Diseño 3D**

Se trata del modelado de los diferentes elementos que conforman a las propuestas elegidas mediante el siguiente proceso:

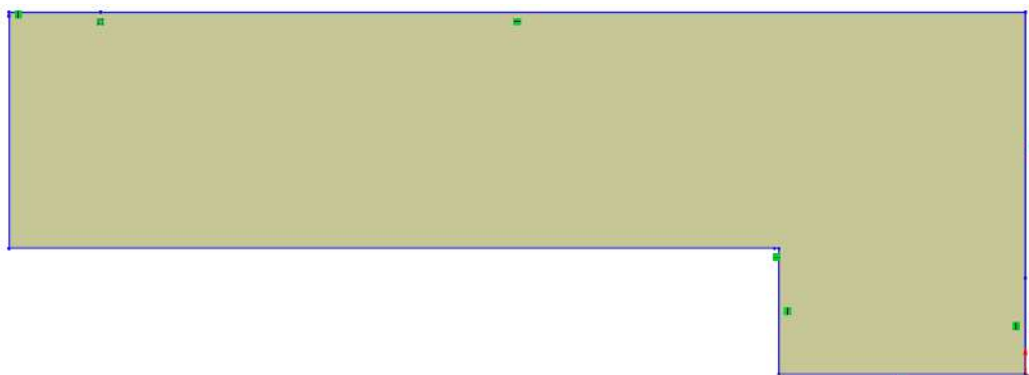
##### Modelado de capas

Esta fase tiene una gran importancia en el desarrollo del proyecto, ya que de aquí se obtienen los datos necesarios para los cálculos que se realizarán más adelante.

Es fundamental que todo se realice sin errores, dado que incluso un pequeño error puede desencadenar problemas significativos en las fases finales del desarrollo, resultando en pérdida de tiempo al intentar corregirlos y pérdida de credibilidad ante los clientes.

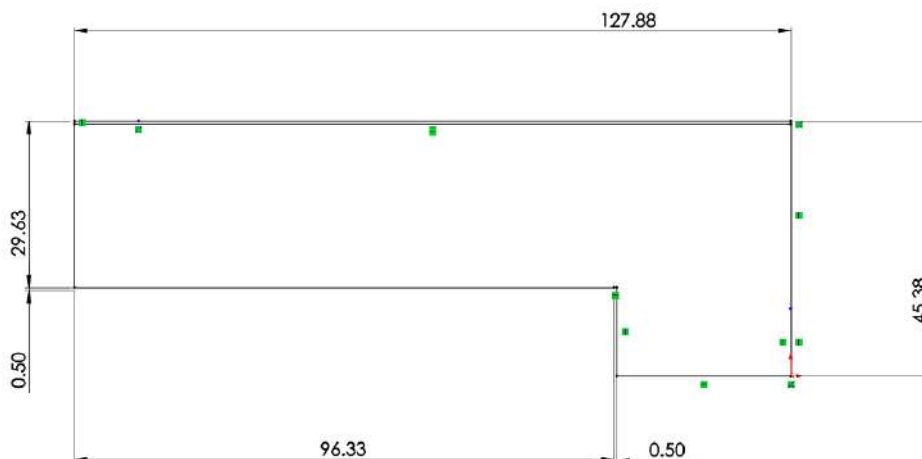
Aquí se desarrollan todas las piezas necesarias que conforman el recubrimiento térmico y la carcasa metálica. Realizar esto implica “seccionar” al horno y posteriormente generar capas con el espesor adecuado según el material del que se encuentran hechas, asegurando que al unirse mantengan la forma original. El número de capas y su espesor se ha definido previamente durante el análisis del plano o levantamiento técnico.

El proceso de creación de las piezas necesarias se puede simplificar mediante una serie de pasos. El primer paso es crear un croquis en alguno de los planos disponibles (por elección propia se utiliza el plano “Alzado”). El segundo paso es dibujar un croquis con la forma deseada, esto se hace utilizando la herramienta de línea (esta herramienta permite trazar contornos y formas). En la siguiente imagen se muestra un ejemplo de una pieza dibujada en el plano alzado, a partir de la cual se crea una pieza tridimensional.



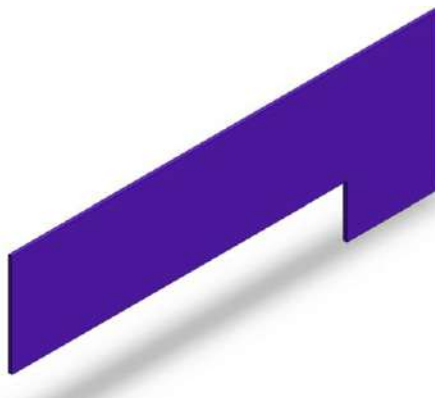
*Imagen 20 Ejemplo de croquis. Elaboración propia*

Para garantizar la precisión en el diseño y el posterior ensamblaje, es necesario asignar medidas exactas a cada una de las piezas. Este tercer paso se lleva a cabo utilizando la herramienta "cota", que permite especificar dimensiones en las diferentes aristas de la forma dibujada.



*Imagen 21 Ejemplo de acotación de croquis. Elaboración propia*

Finalmente, el cuarto y último paso es la extrusión del croquis dibujado, para ello se utiliza la herramienta "extruir". La anchura de la extrusión depende del material de la pieza y su ubicación dentro del horno. Además, durante este paso, se aplica un color seleccionado libremente por el diseñador. Esta codificación de colores ayuda a identificar rápidamente los materiales utilizados en el modelo, facilitando así el proceso de ensamblaje.



*Imagen 22 Coquis extruido*

Este proceso debe ser realizado para cada una de las piezas necesarias en la formación del modelo.

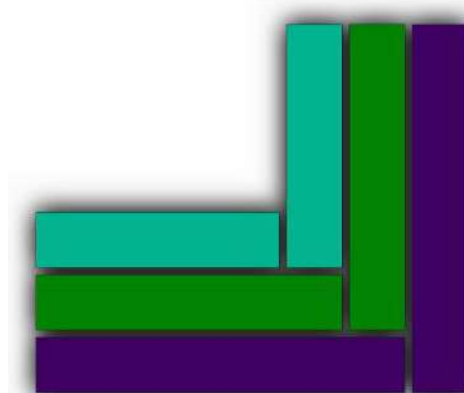
### Uniones

Durante el proceso de diseño de un horno industrial, se deben tener en cuenta ciertas consideraciones para garantizar el eficiente y seguro funcionamiento del

equipo. Un aspecto crítico que es necesario tener presente, es la gestión del calor y el material líquido dentro del horno.

Las fugas a través de las uniones representan una seria amenaza en la operación del horno, ya que no solo reducen la eficiencia del equipo, sino que también pueden causar daños irreversibles e importantes en las piezas externas y el entorno en el que se encuentra. Es por ello por lo que se debe adoptar una configuración que minimice la posibilidad de tales fugas y se asegure un control efectivo del calor.

Esta configuración debe asegurarse de que, en caso de fuga, la temperatura disminuya gradualmente a lo largo de la distancia de la unión, reduciendo el riesgo de daños externos y garantizando un funcionamiento seguro. Al minimizar las pérdidas de calor, se optimiza el rendimiento del horno y se reducen los costos asociados con el mantenimiento y la reparación. Esta configuración se muestra en la siguiente imagen:



*Imagen 23 Unión de paredes*

Comprendidos estos conceptos se puede iniciar con el modelado de las capas internas aislantes, el modelo sólido desarrollado antes servirá para evitar confusiones durante la modelización.

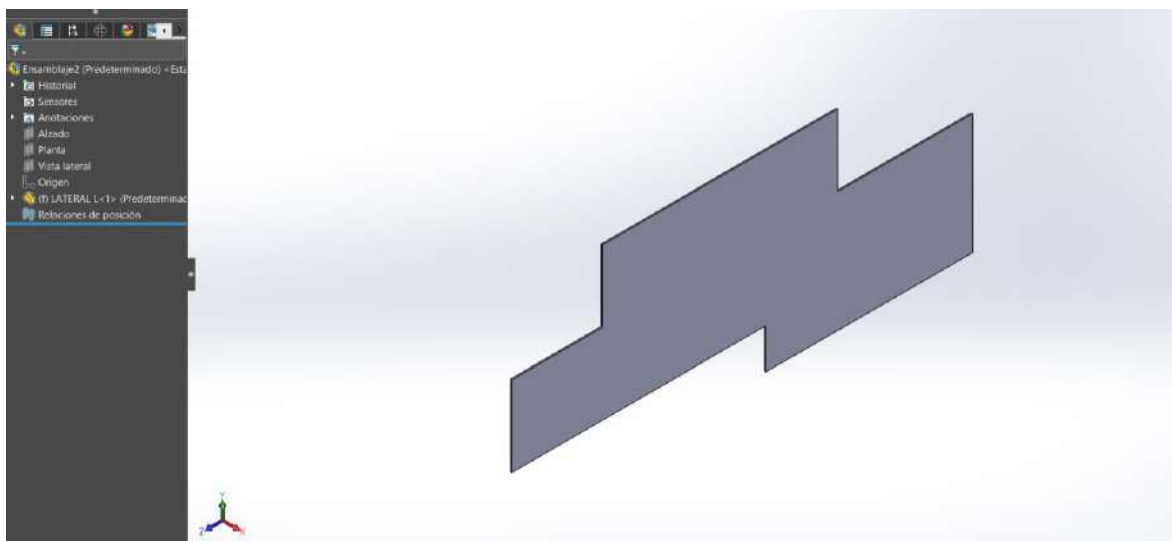
#### **3.4.3.2 Ensamblaje**

Tras tener listas todas las piezas necesarias, se comienza con el ensamble de estas. Para ello, es necesario seleccionar la herramienta “Ensamblaje” al momento de generar un nuevo documento. Esto habilitará todas las herramientas necesarias para llevar a cabo el proceso de ensamblaje.



*Imagen 24 Interfaz de selección. Elaboración propia*

Una vez que se ha creado el documento de ensamblaje, se comienza a agregar cada una de las piezas diseñadas previamente. Esto se logra utilizando la herramienta “Insertar Componentes”, lo cual permitirá seleccionar las piezas desde la biblioteca. El software requiere que se añada una pieza inicial, la cual funcionará como base sobre la que se irán colocando las demás piezas.

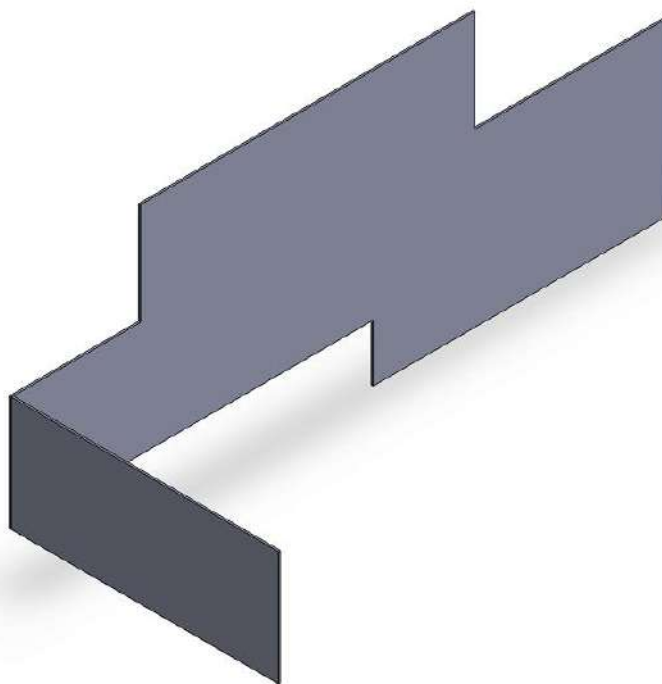


*Imagen 25 Pieza inicial*

Para unir dos piezas se utilizan “Relaciones de posición”, las cuales sirven para definir la ubicación de dos piezas en un espacio de trabajo. SolidWorks posee diversas relaciones de posición, seleccionar una u otra dependerá de lo que se necesite en el momento de ensamblar:

- **Coincidente:** hace que dos caras planas se vuelvan inseparables, pudiéndose mover una a lo largo de la otra.
- **Paralela:** vuelve a dos caras o aristas completamente paralelas, pudiéndose mover en cualquier dirección sin llegar a juntarse.
- **Perpendicular:** forma un ángulo de  $90^\circ$  entre dos caras o aristas.
- **Tangente:** hace que una cara o línea recta toque a una cara circular en un solo punto.
- **Concéntrica:** hace que dos caras circulares tengan su centro en un mismo punto, pudiéndose mover a lo largo de este eje, pero sin separarse.
- **Bloquear:** fija una cara con respecto a la posición de otra.
- **Distancia:** añade una separación “x” entre dos caras o líneas.
- **Ángulo:** forma un ángulo “x” entre las dos caras o líneas seleccionadas.

Estas relaciones pertenecen a la categoría “Estándar”. Si bien existen más relaciones de posición, para este proyecto basta con el uso de estas. Un ejemplo de aplicación de estas se muestra en la imagen, en esta se utilizan relaciones de coincidencia para colocar la pieza en la posición requerida



*Imagen 26 Ejemplo de ensamble*

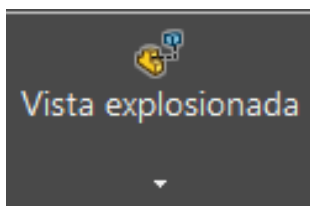
Es importante asegurarse de que las piezas se unan teniendo en cuenta todas las consideraciones previas. Al unir las, es importante prestar atención a detalles como la orientación, la alineación y la interacción entre las diferentes partes del ensamblaje, evitando interferencias entre ellas.

Una vez que todas las piezas se han unido, se debe realizar una verificación final para asegurarse de que el ensamblaje esté completo y correcto. Una forma de comprobar esto de manera rápida es mediante un análisis de interferencias.

### 3.4.3.3 Vista explosionada

Generar una vista explosionada en SolidWorks permite comprender dónde y de qué manera se colocan todas las piezas del ensamble. Crearla es bastante simple y fácil.

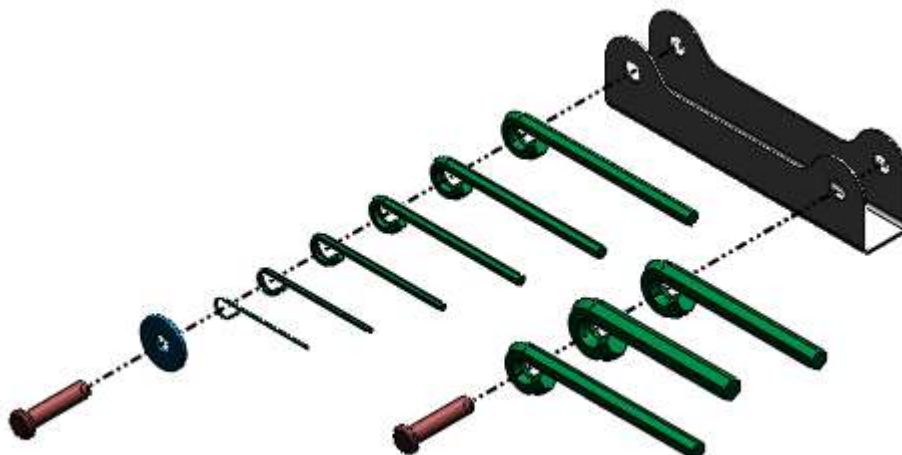
Desde la barra de herramientas se selecciona la opción llamada “Vista explosionada”. Esto abre un menú lateral que permite seleccionar cada una de las piezas y moverlas individualmente. Cada pieza debe ser movida a una distancia específica “x” (la cual quedará a consideración del diseñador), de modo que todas sean visibles y puedan apreciarse claramente.



*Imagen 27 Herramienta de vista explosionada. Elaboración propia*

La vista explosionada en SolidWorks es una herramienta que puede ser utilizada para diversos propósitos acorde a las necesidades del diseñador. En el contexto de este proyecto, desempeña un papel crucial en la planificación y construcción del revestimiento térmico, ya que permite identificar visualmente la ubicación y disposición de cada uno de los materiales de las diferentes paredes del horno.

Basándose en la memoria de cálculo y asociando resultados, es posible saber el peso de cada pared del revestimiento. Esta información es importante al momento de tomar decisiones durante el proceso de construcción, permitiendo evaluar diversas alternativas y métodos de construcción para seleccionar el más adecuado y lograr un buen resultado final.



*Imagen 28 Dassault systemes. (2022). Ejemplo de vista explosionada. Recuperado de [https://help.solidworks.com/2022/spanish/SolidWorks/sldworks/t\\_Exploded\\_Views\\_in\\_Drawings.htm](https://help.solidworks.com/2022/spanish/SolidWorks/sldworks/t_Exploded_Views_in_Drawings.htm)*

### 3.4.4 Desarrollo de detalles

En esta fase se realiza una memoria de cálculo de las diversas propuestas, con el fin de determinar la solución más efectiva al problema presentado. Para ello se realizan diversas acciones:

#### 3.4.4.1 Volumetría

Obtener los datos sobre el área y volumen de cada pieza es un paso esencial en la elaboración de las propuestas de diseño. Al contar con esta información, se determina la cantidad exacta de material necesaria para su construcción. Calcular estos valores con precisión nos ayuda a reducir pérdidas debido a excedentes innecesarios o problemas causados por la falta de material. Esta fase se encuentra dividida en varios pasos, los cuales se describen a continuación.

##### Obtención de superficie

En esta fase solo es necesario obtener el área de todas las piezas. Esto se puede hacer de dos maneras: realizando cálculos manuales o con la ayuda del software. Para fines de practicidad, se realizan utilizando herramientas presentes en SolidWorks.

Para la obtención de área se utiliza la herramienta “medir”. Esta herramienta permite obtener diversas variables, como son: áreas, distancias, perímetros, etc. Puede utilizarse tanto en caras, como planos, vértices, aristas. Utilizarla es tan sencillo como activarla y seleccionar los elementos que se desea medir. El área que necesitamos obtener es el de la cara que se encuentre en contacto con la superficie, la cual se denomina “cara principal”.

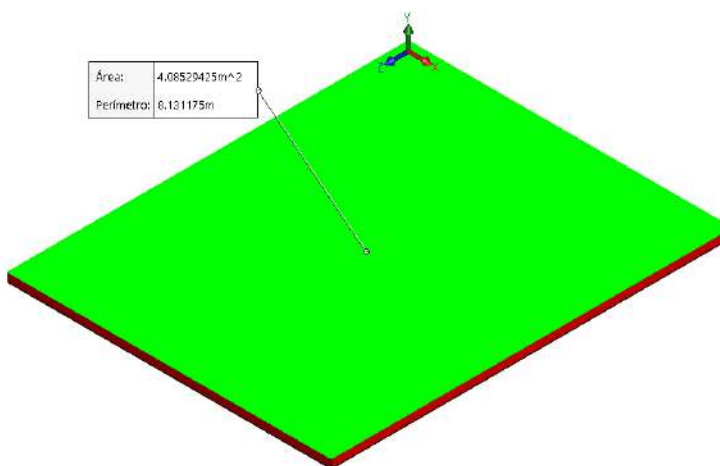
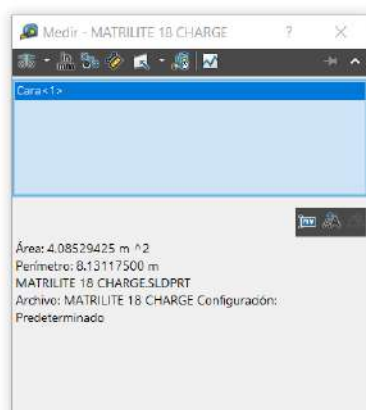


Imagen 29 Ejemplo de obtención de área. Elaboración propia

Este proceso debe ser repetido en todas las piezas que conforman el revestimiento térmico, recordando seleccionar siempre la cara principal, la cual depende de la ubicación de la pieza. Los valores obtenidos deberán registrarse en una tabla de Excel para su posterior uso:

Tabla 9 Tabla de datos

| ### | MATERIAL    | ÁREA (m <sup>2</sup> ) |
|-----|-------------|------------------------|
| 1   | AISLANTE    | 4                      |
| 2   | AISLANTE    | 4                      |
| 3   | REFRACTARIO | 4                      |

## Obtención de volumen

Una de las limitaciones de la herramienta “medir” es que no es capaz de realizar cálculo de volumen. Podría obtenerse al multiplicar el área por el espesor de la pieza, sin embargo, este proceso tomaría más tiempo del necesario.

SolidWorks tiene una herramienta que puede realizar este cálculo de manera rápida y fácil, esta herramienta tiene por nombre “Propiedades físicas” y como su nombre indica, es capaz de realizar el cálculo de diversas variables relacionadas con las características físicas de la pieza: como lo son masa, volumen y densidad. Para utilizarla, basta con seleccionarla de la barra de herramientas, donde se abre una ventana con información acerca de la pieza:

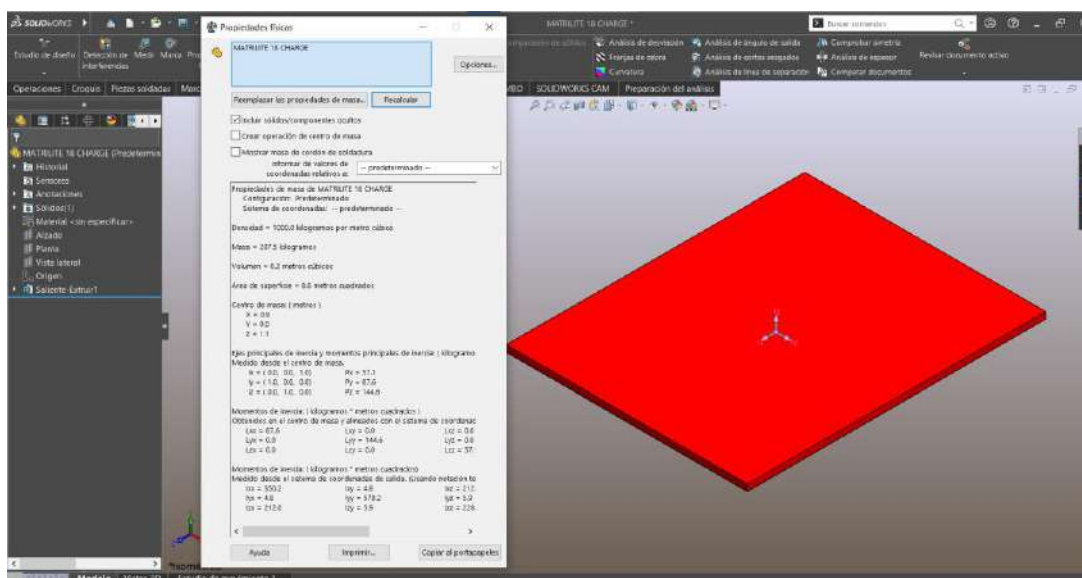


Imagen 30 Herramienta de Propiedades físicas. Elaboración propia

Como se observa en la imagen, además del volumen, el programa ha arrojado valores para la masa y la densidad. Sin embargo, hay que tener en cuenta que, en caso de no haber asignado algún material a la pieza a medir, se asignará un valor por defecto de  $1000 \text{ kg/m}^3$  para la densidad, valor que se utilizará para realizar el cálculo de la masa. Es por ello que estos valores se desprecian al no tener relevancia. El valor de la densidad no afectará al valor del volumen proporcionado, ya que para su cálculo solo hace uso de la geometría de la pieza.

Se puede observar que también ha arrojado un resultado denominado “área de superficie”. Este valor corresponde a la suma de las áreas de todas las caras que conforman el sólido. No hay que confundirlo con el valor obtenido con la herramienta “medir”, ya que ese solo es el correspondiente a una cara.

El valor del volumen debe ser añadido en otra columna de la tabla de Excel. Este proceso deberá repetirse para todas las piezas internas, para posteriormente complementar esta tabla.

Tabla 10 Tabla de datos

| ### | MATERIAL    | ÁREA (m <sup>2</sup> ) | VOLUMEN (m <sup>3</sup> ) |
|-----|-------------|------------------------|---------------------------|
| 1   | AISLANTE    | 4                      | 1                         |
| 2   | AISLANTE    | 4                      | 1                         |
| 3   | REFRACTARIO | 4                      | 1                         |

#### 3.4.4.2 Obtención de cantidad de material

El cálculo de material es el paso más importante en la elaboración del proyecto, ya que, a partir de este, es posible conocer con precisión la cantidad monetaria a desembolsar para la construcción del horno. En esta fase, es necesario familiarizarse con las características y datos técnicos de los materiales utilizados.

Para realizar este cálculo, es indispensable conocer diversos datos sobre los materiales, específicamente es necesario conocer: su presentación, su densidad y su conductividad térmica. Estos datos se encuentran en las fichas técnicas de los materiales.

Para calcular la cantidad de material a utilizar se usan dos procedimientos sencillos en función de la presentación en la que el fabricante del material lo tenga:



1.- Si la presentación es en tablas/piezas, se buscan sus dimensiones (largo y ancho) para posteriormente obtener su área. Luego, se divide el área de cada pieza diseñada entre el área de cada pieza de material. Ejemplo:

$$\text{área de pieza diseñada}; 4.09\text{m}^2 \quad - \quad \text{área de cada tabla}; 0.6\text{m}^2$$

$$\# \text{ de material: } \frac{4.09\text{m}^2}{0.6\text{m}^2} = 6.81 \approx 7 \text{ piezas}$$

En caso de que el fabricante no posea tablas del ancho requerido, es necesario encimar otras del mismo material, pero de diferente espesor hasta tener el ancho correspondiente. Por ejemplo, si se requiere un espesor de 4" pero el fabricante solo posee tablas de 2", entonces es necesario utilizar dos capas de 2" para formar el ancho requerido.

2.- Si se trata de un concreto, se utiliza el valor de su densidad, el cual se multiplica por el valor del volumen de la pieza. Este paso se aplica regularmente en materiales refractarios. Ejemplo:

*Refractario – Pared superior ancha*

$$v = 0.68 \text{ m}^3 \quad - \quad \rho = 2520 \text{ kg/m}^3$$

$$\# \text{ de material: } (0.68 \text{ m}^3) (2520 \text{ kg/m}^3) = 1713.6 \approx 1712 \text{ kg}$$

Todos los resultados obtenidos deben ser redondeados para tener una cantidad extra de material que funcione como margen de seguridad. Se anotan todos los datos anteriores en la tabla de Excel y se realiza el proceso adecuado según el tipo de material.

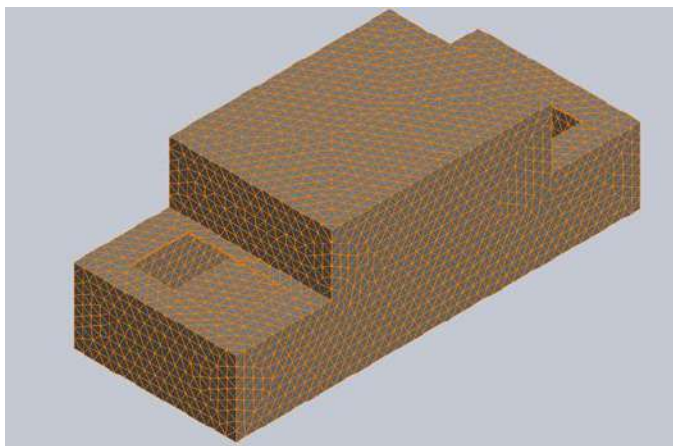
### 3.4.4.3 Análisis térmico

Cuando se diseña un horno, no basta con simplemente calcular la cantidad de material necesario o probar diferentes propuestas con distintos materiales. Es importante comprender cual será el comportamiento del calor una vez que el horno esté en funcionamiento. Partiendo de esta premisa, surge la necesidad de llevar a cabo un análisis térmico. Este análisis permitirá comprender la distribución de calor en la cara fría del horno. Es necesario conocer algunas variables que deben ser colocadas sobre el modelo a realizar. Estas variables se muestran en la tabla:

*Tabla 11 Variables para análisis térmico*

| VARIABLE                     | UNIDADES           |
|------------------------------|--------------------|
| Temperatura interior         | °C                 |
| Temperatura ambiente         | °C                 |
| Coeficiente de transferencia | W/m <sup>2</sup> K |

Este análisis se realiza mediante el método de elemento finito, para lo cual primero es necesario dividir el modelo en “elementos” pequeños. Es necesario resaltar que, cuanto más pequeños sean estos, mayor será la precisión en los resultados obtenidos; sin embargo, esto también consumirá una mayor cantidad de recursos del ordenador. Por ello, es importante considerar esto al definir el tamaño de los elementos.



*Imagen 31 Malla. Elaboración propia*

Posteriormente se colocan las variables previamente definidas de la siguiente manera:

El coeficiente de transferencia y la temperatura ambiente se colocan en las secciones correspondientes de la carcasa metálica, ya que es en esas zonas donde se desea conocer la temperatura que se tendrá, tal como se muestra en la siguiente imagen:

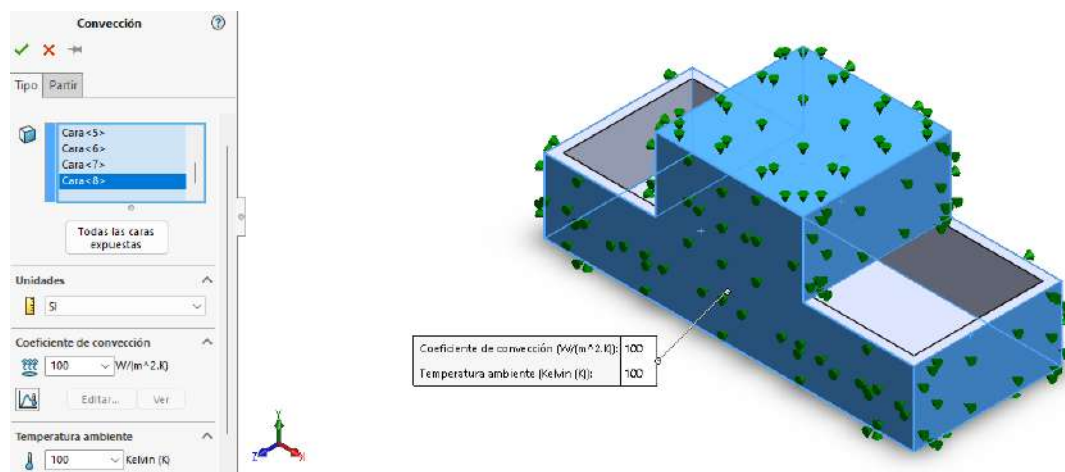


Imagen 32 Ejemplo de variables colocadas. Elaboración propia

La temperatura interna se coloca en las zonas correspondientes al refractario interno del horno, tal como se muestra en la siguiente imagen:

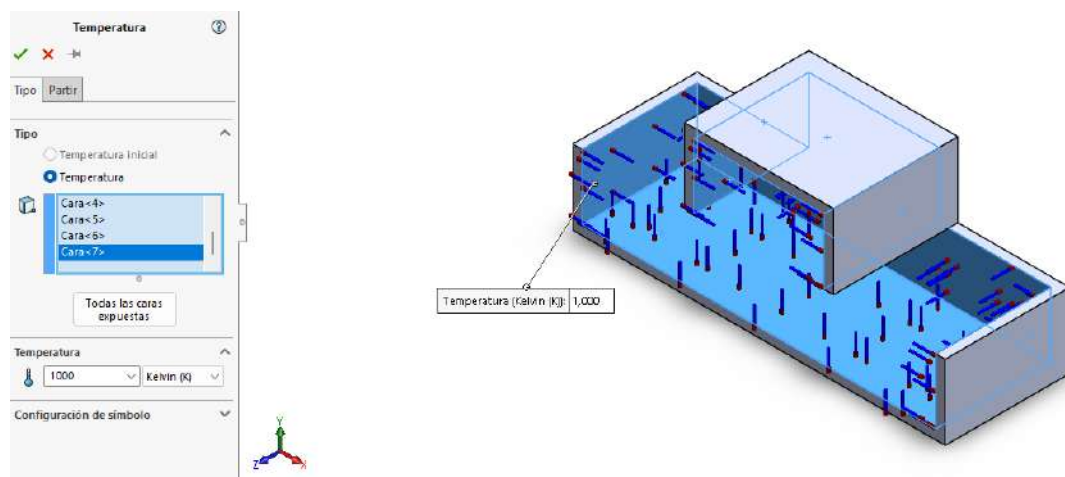


Imagen 33 Ejemplo de variables colocadas. Elaboración propia

Tras haber colocado todas las variables, se ejecuta el análisis para que el software pueda realizar los cálculos necesarios. Tras finalizar el cálculo se modifican las escalas a consideración del diseñador y se realizan las acciones necesarias para el proyecto.



## CAPITULO IV. REDISEÑO DE HORNOS

### 4.1 Horno de fundición tipo túnel reverbero con bahía de recirculación 1

#### 4.1.1 Análisis del problema

Se trata de un horno reverbero utilizado para fundir aluminio el cual requiere ser construido. Este horno pertenece a la empresa NIDEC MOTOR Co. ubicada en Apodaca, Nuevo León, México. Se debe aplicar la metodología desarrollada para la obtención de los datos necesarios para sustentar las propuestas que serán presentadas al cliente.

La empresa ha proporcionado un plano del cual se ha extraído la siguiente información:

1.- Se han obtenido las medidas de las siguientes secciones externas.

*Tabla 12 Medidas*

| MEDIDAS                    |
|----------------------------|
| ALTURA                     |
| LONGITUD                   |
| ANCHO                      |
| ALTURA DEL TANQUE          |
| ALTURA DEL DIP             |
| LONGITUD DEL POZO DE CARGA |
| LONGITUD DEL DIP           |

## 2.- Revestimiento interno

Tabla 13 Materiales del revestimiento interno

| MATERIAL                    |
|-----------------------------|
| AISLANTE 1                  |
| AISLANTE 2                  |
| REFRACTARIO 1 (15% ALÚMINA) |
| AISLANTE 3                  |
| REFRACTARIO 2 (70% ALÚMINA) |
| REFRACTARIO 3 (60% ALÚMINA) |
| REFRACTARIO 4 (65% ALÚMINA) |
| REFRACTARIO 5 (50% SÍLICE)  |

### 4.1.2 Diseño conceptual

Utilizando la información acerca de las medidas del horno, se realiza un modelo sólido inicial que se utilizará como base para las siguientes fases. Este modelo se muestra en la siguiente imagen.

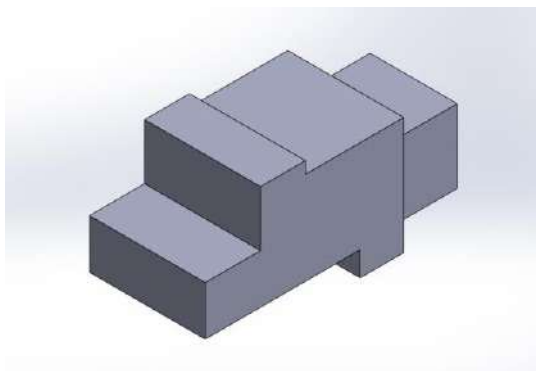
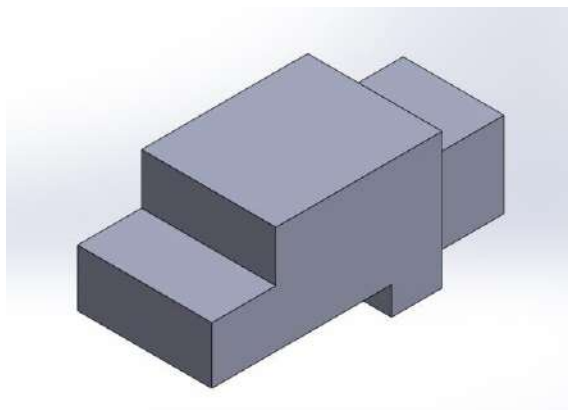


Imagen 34 Sólido inicial

Durante el desarrollo de esta fase, este modelo presentó un cambio significativo en su geometría: se eliminó la zona correspondiente a la chimenea para facilitar el diseño. Para evitar errores respecto al material eliminado, se considera un factor de seguridad en las cantidades finales.



*Imagen 35 Nuevo sólido inicial*

Antes de seguir con las fases siguientes es necesario tener en cuenta que, al deber presentar diversas propuestas, es necesario repetir las fases “representación de esquemas” y “desarrollo de detalles” para cada una.

#### 4.1.3 Esquema de detalles 1

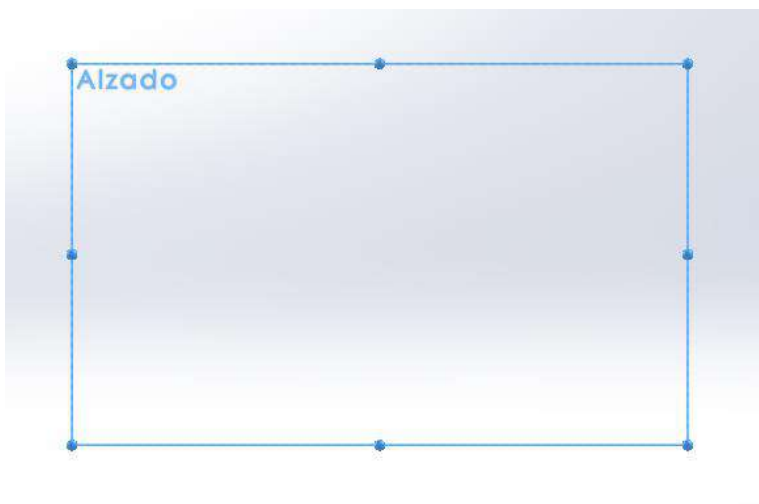
Antes de realizar el diseño de cada una de las piezas necesarias para el revestimiento térmico, se asignan colores a los diferentes materiales con el fin de tener una mejor representación visual, así como una mejor estética.

*Tabla 14 Materiales utilizados*

|                             |                                                                                      |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| AISLANTE 1                  |  |
| AISLANTE 2                  |  |
| REFRACTARIO 1 (15% ALÚMINA) |  |
| AISLANTE 3                  |  |
| REFRACTARIO 2 (70% ALÚMINA) |  |
| REFRACTARIO 3 (60% ALÚMINA) |  |
| REFRACTARIO 4 (65% ALÚMINA) |  |
| REFRACTARIO 5 (50% SÍLICE)  |  |

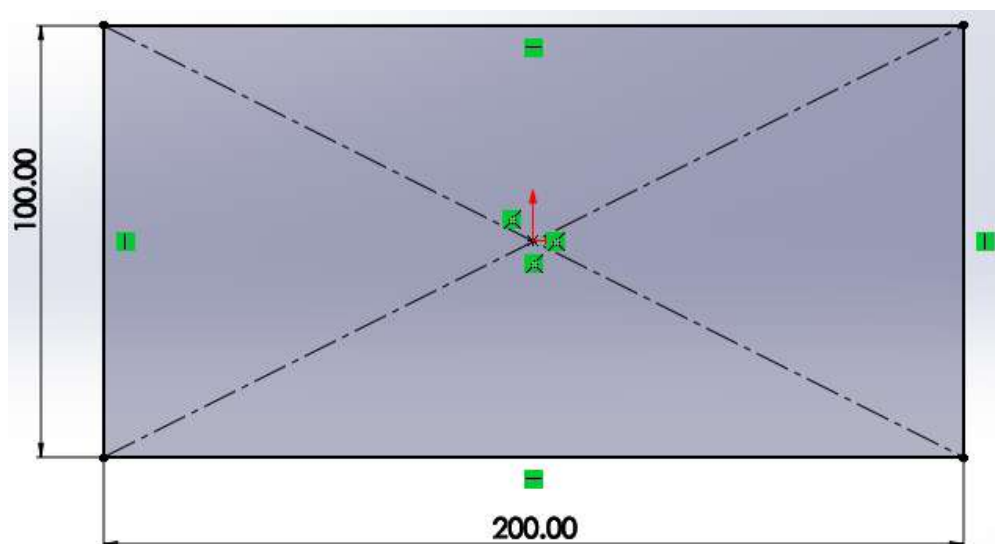
En todo diseño de horno que se realice se debe respetar la configuración de uniones mostradas en el punto 3.5.3.1 para evitar que el calor llegue al exterior de manera fácil.

Para el modelado de las diversas piezas a utilizar, se sigue el procedimiento definido en el punto 3.5.3.1. Se comienza por seleccionar el plano sobre el cual se trabajará, el cual es el plano alzado y fue definido por elección personal.



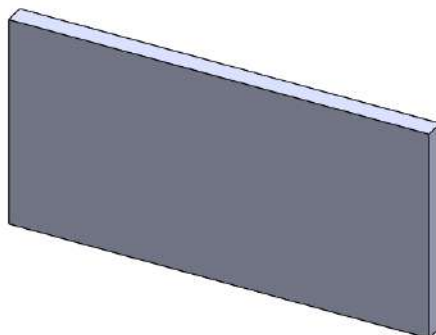
*Imagen 36 Plano alzado. Elaboración propia*

Después, se traza la forma de la pieza a modelar, recordando agregar correctamente sus dimensiones mediante cotas. Es importante que todos los croquis trazados estén completamente definidos para evitar errores durante el uso de operaciones. Esto se ejemplifica en la siguiente imagen:



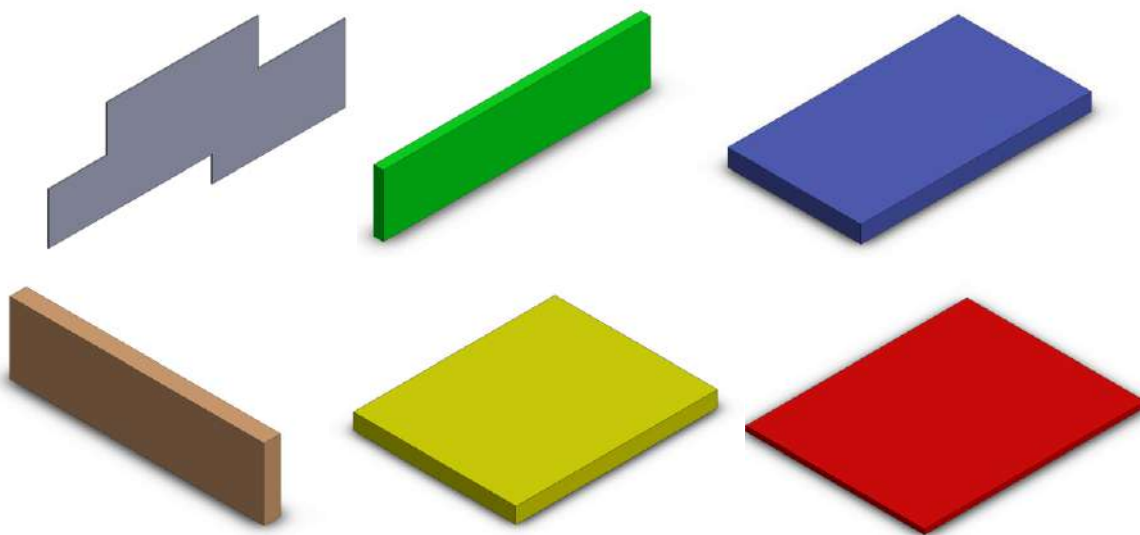
*Imagen 37 Croquis de pieza*

Finalmente, se añade volumen mediante la herramienta “extrusión”, definiendo el espesor necesario acorde a la información obtenida, y se acepta la operación.



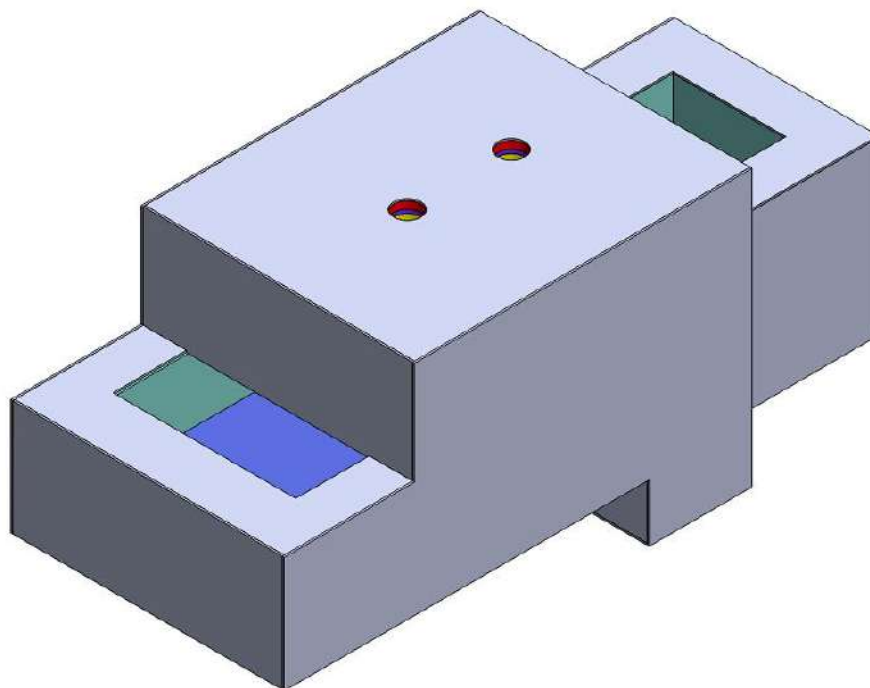
*Imagen 38 Pieza sólida*

Se repite este proceso para todas las piezas necesarias para formar el horno. Algunas piezas realizadas se muestran en la siguiente imagen.

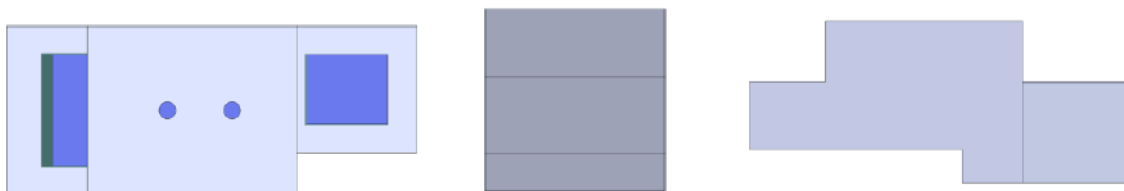


*Imagen 39 Piezas diseñadas*

Con todas las piezas modeladas, estas deben ser ensambladas. Esto se logra añadiendo relaciones de posición entre cada pieza, utilizando principalmente la relación “coincidente”. El ensamble resultante se aprecia en las siguientes imágenes:

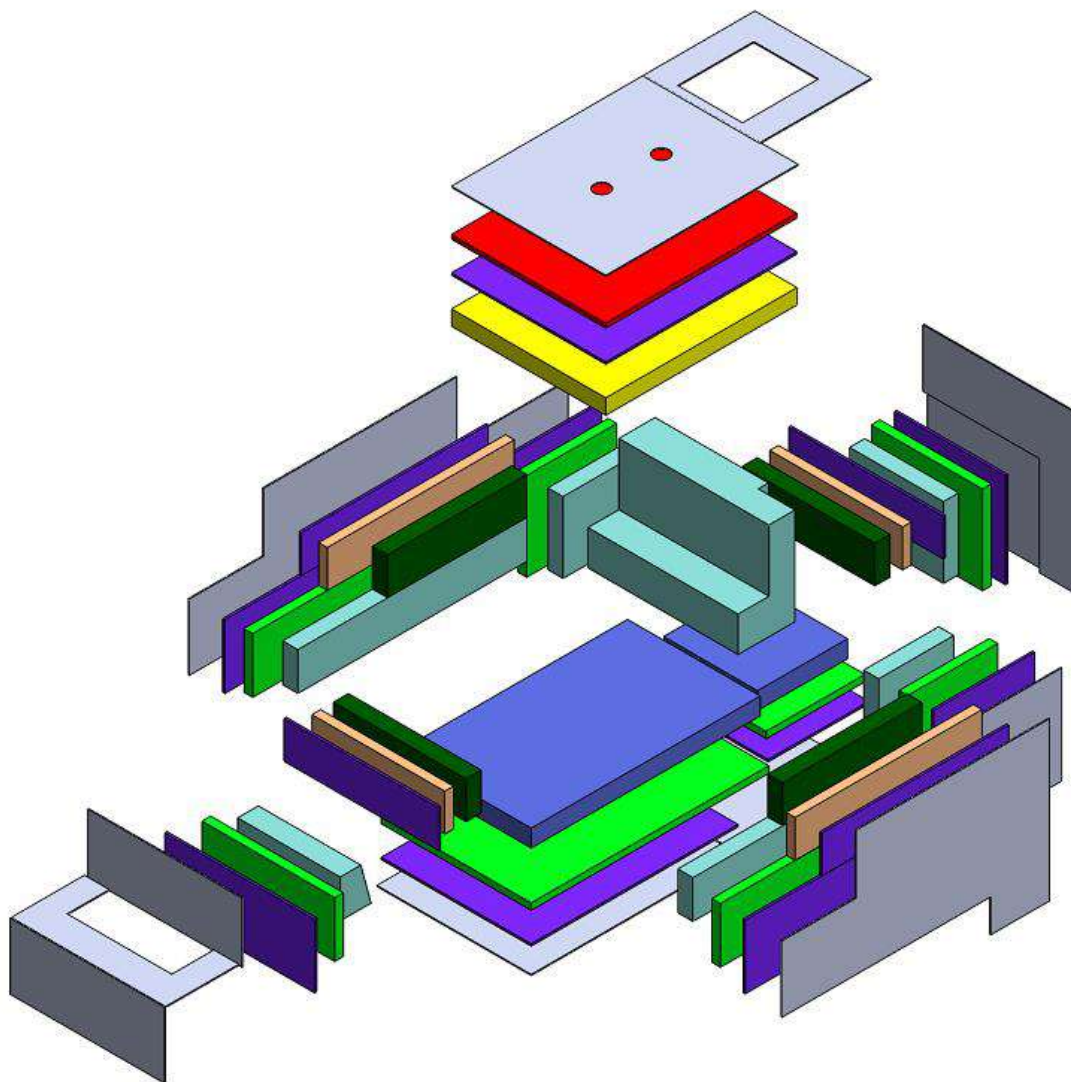


*Imagen 40 Vista isométrica de ensamble final. Elaboración propia*



*Imagen 41 Vistas superior, frontal y lateral. Elaboración propia*

Una vez que el ensamblaje esté completo, se puede crear la vista explosionada siguiendo el punto 3.5.3.3. Sin embargo, es importante asegurarse de que la vista explosionada mantenga una forma similar al ensamblaje normal para que sea fácil de interpretar. La vista explosionada utilizada en este ensamble es la siguiente:



*Imagen 42 Vista explosionada. Elaboración propia*

#### **4.1.4 Desarrollo de detalles 1**

Con el modelo final del horno completado, se procede a la obtención de la volumetría de cada pieza utilizada conforme a lo definido en el punto 3.5.4.1.

Se inicia obteniendo el área de la cara principal de cada pieza. Al hablar de “cara principal”, se hace referencia a aquella cara que entra en contacto directo con otra pieza y que es paralela a alguna de las paredes del horno. Esto se aprecia en la siguiente imagen:

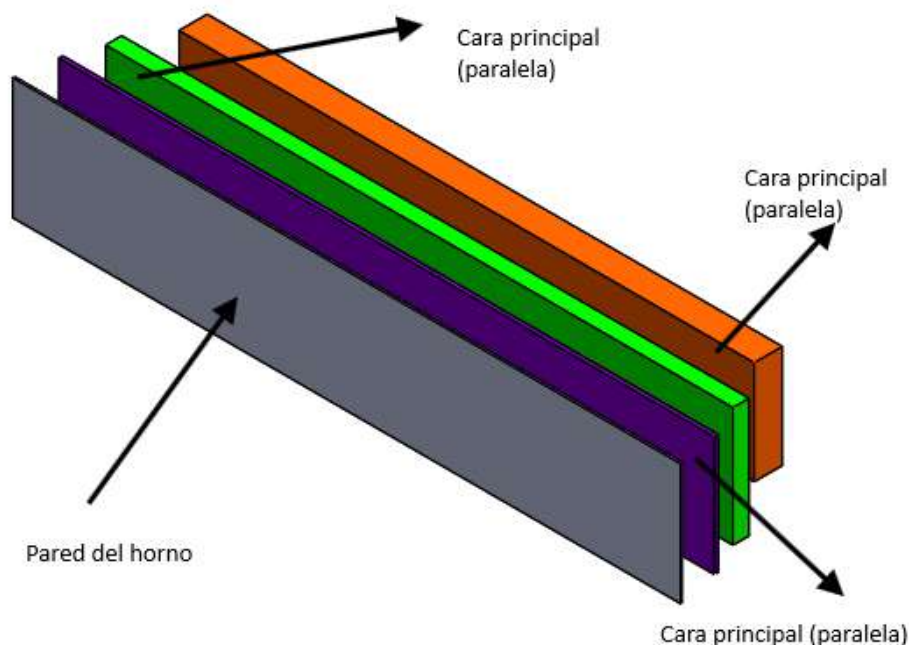


Imagen 43 Caras principales en función de la pared del horno. Elaboración propia

Para la obtención del volumen de la pieza no hay consideración alguna; se selecciona la pieza a la cual se desea conocer su volumen mediante la herramienta de propiedades físicas. Esto se ejemplifica en la siguiente imagen:

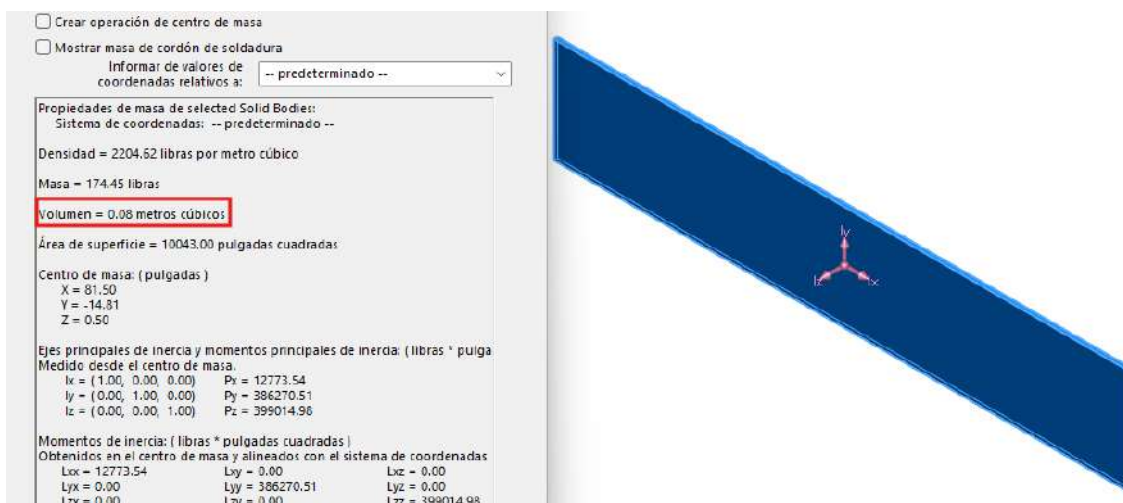


Imagen 44 Obtención de volumen. Elaboración propia

Los valores que sean obtenidos deben ser anotados en una tabla de Excel para su posterior uso en las fases siguientes:



Tabla 15 Resultados de volumetría

| ## | MATERIAL            | ÁREA (m <sup>2</sup> ) | VOLUMEN (m <sup>3</sup> ) |
|----|---------------------|------------------------|---------------------------|
| 1  | REFRACTARIO 5       | 4.09                   | 0.72                      |
| 2  | REFRACTARIO 1       | 4.09                   | 0.2                       |
| 3  | AISLANTE 1          | 4.09                   | 0.1                       |
|    |                     |                        |                           |
| 4  | AISLANTE 1          | 0.8                    | 0.02                      |
| 5  | AISLANTE 3          | 0.68                   | 0.07                      |
| 6  | REFRACTARIO 3       | 0.68                   | 0.12                      |
|    |                     |                        |                           |
| 7  | AISLANTE 1          | 0.96                   | 0.02                      |
| 8  | AISLANTE 3          | 0.96                   | 0.1                       |
| 9  | REFRACTARIO 3       | 0.72                   | 0.13                      |
|    |                     |                        |                           |
| 10 | AISLANTE 1          | 1.33                   | 0.03                      |
| 11 | AISLANTE 2          | 1.02                   | 0.1                       |
| 12 | REFRACTARIO 2       | -                      | 0.16                      |
| 13 | REFRACTARIO 2 CENT. | -                      | 1.06                      |
|    |                     |                        |                           |
| 14 | AISLANTE 1          | 4.1                    | 0.1                       |
| 15 | AISLANTE 1          | 2.61                   | 0.07                      |
| 16 | AISLANTE 2          | 1.82                   | 0.18                      |
| 17 | REFRACTARIO 2       | -                      | 0.21                      |
|    |                     |                        |                           |
| 18 | AISLANTE 1          | 1.46                   | 0.04                      |
| 19 | AISLANTE 2          | 1.36                   | 0.14                      |
| 20 | REFRACTARIO 2       | 0.92                   | 0.16                      |
|    |                     |                        |                           |
| 21 | AISLANTE 1          | 1.35                   | 0.03                      |
| 22 | AISLANTE 2          | 1.1                    | 0.11                      |
| 23 | REFRACTARIO 2       | 0.74                   | 0.13                      |
|    |                     |                        |                           |
| 24 | AISLANTE 1          | 4.3                    | 0.11                      |
| 25 | AISLANTE 2          | 4.94                   | 0.38                      |
| 26 | REFRACTARIO 4       | 4.21                   | 0.86                      |
|    |                     |                        |                           |
| 27 | AISLANTE 1          | 1.58                   | 0.04                      |
| 28 | AISLANTE 2          | 1.52                   | 0.12                      |
| 29 | REFRACTARIO 4       | 1.17                   | 0.24                      |

Antes de continuar, es necesario buscar las fichas técnicas de estos materiales y obtener algunos datos necesarios para los cálculos. En esta propuesta se utilizan los materiales mencionados en el plano, los cuales se denominarán “originales”. En la siguiente tabla se muestran los datos necesarios para continuar el cálculo.

Tabla 16 Datos de materiales originales

| MATERIAL                    | LARGO<br>(m) | ANCHO<br>(m) | ÁREA<br>(m <sup>2</sup> ) | DENSIDAD<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
|-----------------------------|--------------|--------------|---------------------------|----------------------------------|
| AISLANTE 1                  | 1            | 0.6          | 0.6                       | 300                              |
| AISLANTE 2                  | 1            | 1.25         | 1.25                      | 255                              |
| REFRACTARIO 1 (15% ALÚMINA) | -            | -            | -                         | 320                              |
| AISLANTE 3                  | 1.2          | 0.6          | 0.72                      | 224.25                           |
| REFRACTARIO 2 (70% ALÚMINA) | -            | -            | -                         | 2660                             |
| REFRACTARIO 3 (60% ALÚMINA) | -            | -            | -                         | 2520                             |
| REFRACTARIO 4 (65% ALÚMINA) | -            | -            | -                         | 2590                             |
| REFRACTARIO 5 (50% SÍLICE)  | -            | -            | -                         | 2210                             |

Para obtener la cantidad de material, es necesario seguir el procedimiento mostrado en el punto 3.5.4.2. Repitiendo estos procesos para cada pieza se obtienen las siguientes cantidades de material:

Tabla 17 Cantidad de material

| MATERIAL                    | CANTIDAD |      |
|-----------------------------|----------|------|
|                             | KG       | PZAS |
| AISLANTE 1                  | -        | 41   |
| AISLANTE 2                  | -        | 12   |
| REFRACTARIO 1 (15% ALÚMINA) | 64       | -    |
| AISLANTE 3                  |          | 5    |
| REFRACTARIO 2 (70% ALÚMINA) | 5480     | -    |
| REFRACTARIO 3 (60% ALÚMINA) | 1260     | -    |
| REFRACTARIO 4 (65% ALÚMINA) | 2849     | -    |
| REFRACTARIO 5 (50% SÍLICE)  | 1592     |      |

### 4.1.5 Análisis Térmico 1

La siguiente fase consiste en realizar el análisis térmico con el propósito de determinar las temperaturas en la cara fría durante su funcionamiento y comprender la transferencia de calor en el modelo. El análisis se realiza conforme a lo mostrado en el punto 3.5.4.3. Las variables a utilizar son las siguientes:

Tabla 18 Variables

| CONDICIÓN                 | VALOR | UNIDAD             |
|---------------------------|-------|--------------------|
| TEMPERATURA AMBIENTE      | 28    | °C                 |
| TEMPERATURA INTERNA       | 1,000 | °C                 |
| COEFICIENTE DE CONVECCIÓN | 15    | W/m <sup>2</sup> K |

El estudio se ejecuta y se obtiene el siguiente resultado:

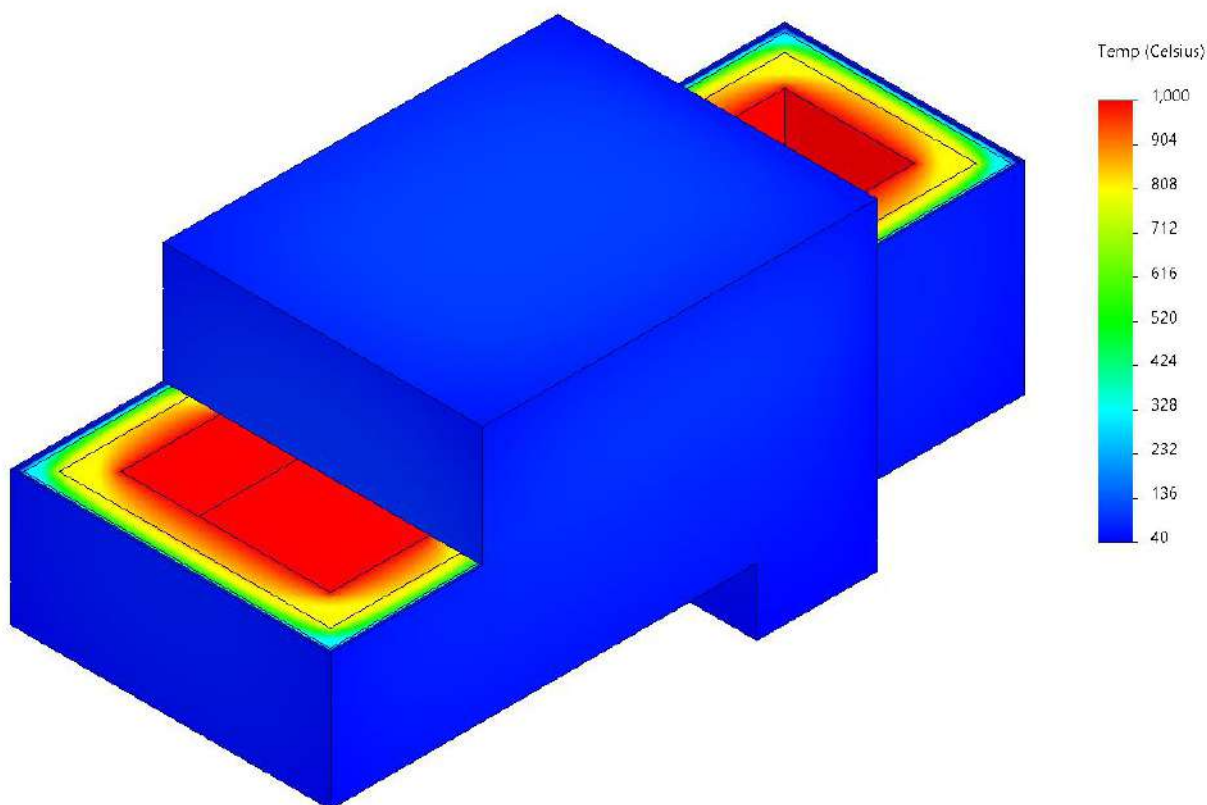


Imagen 45 Resultado térmico, vista isométrica. Elaboración propia

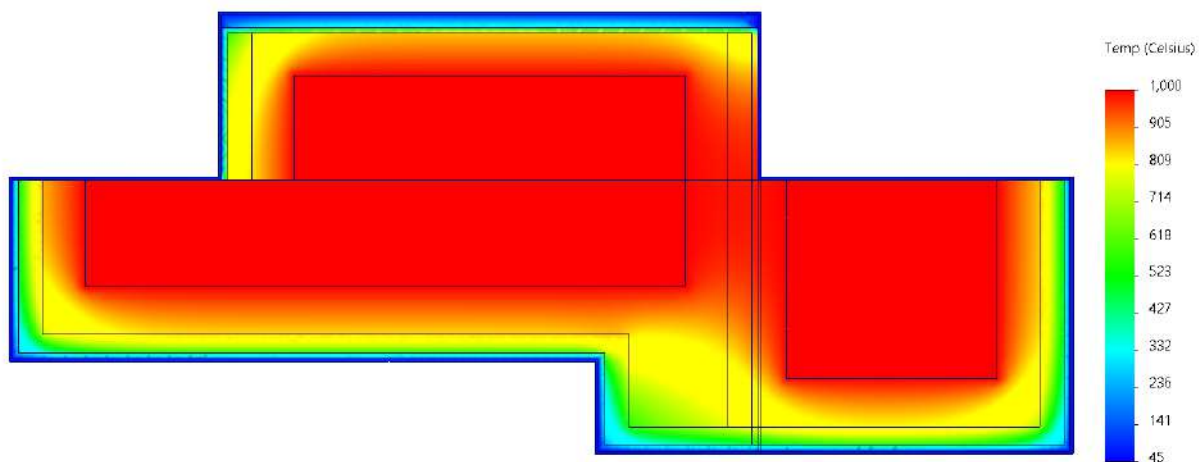


Imagen 46 Resultado térmico, corte lateral. Elaboración propia

Para conocer la variación de la temperatura, es necesario realizar diversas mediciones a lo largo de las superficies internas y externas del horno.

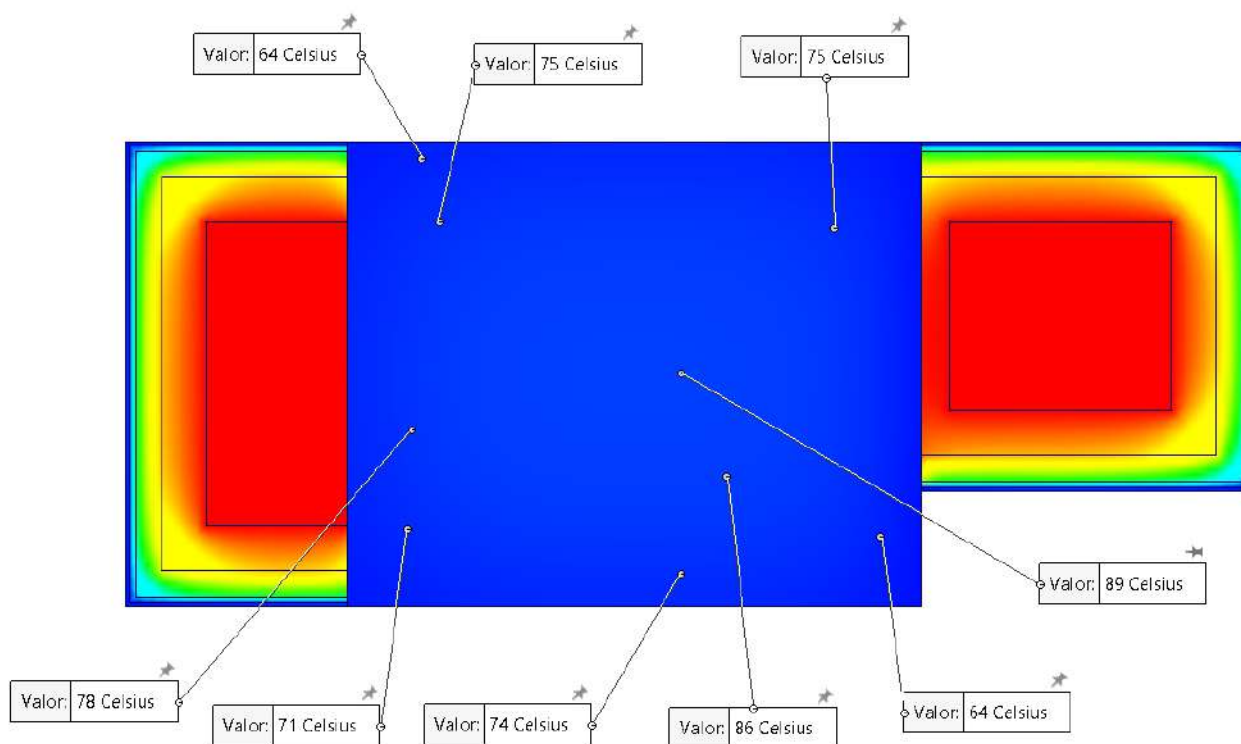


Imagen 47 Mediciones en cara fría, vista superior. Elaboración propia

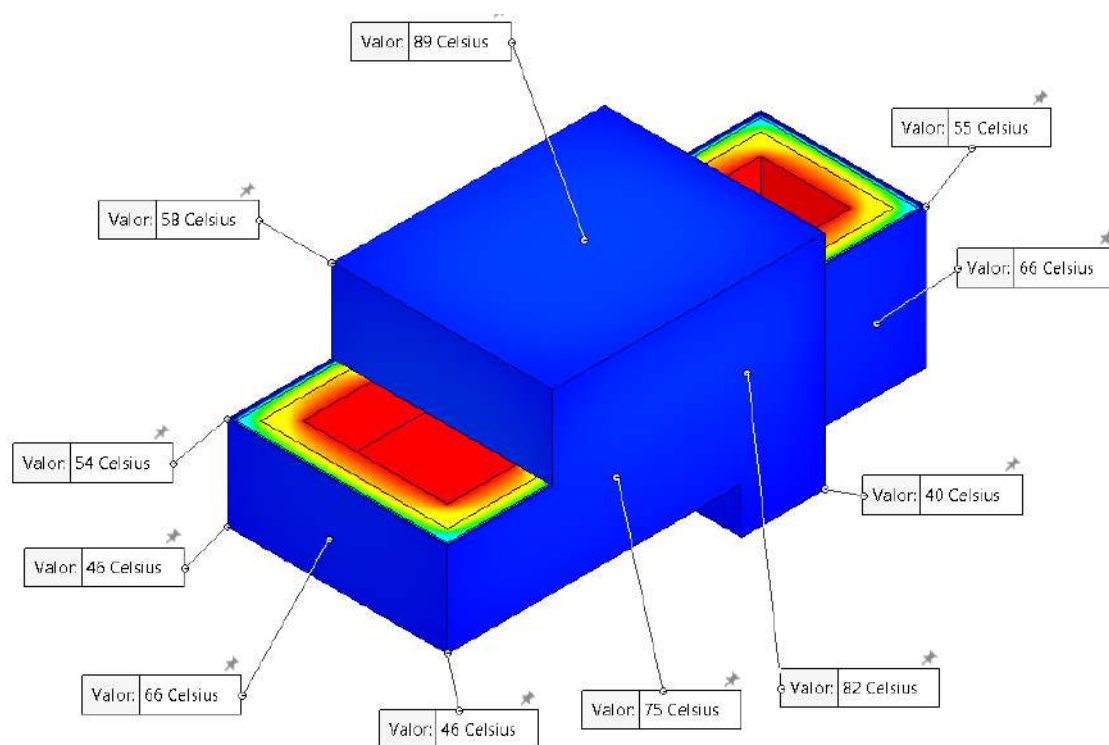


Imagen 48 Mediciones en cara fría, vista isométrica. Elaboración propia

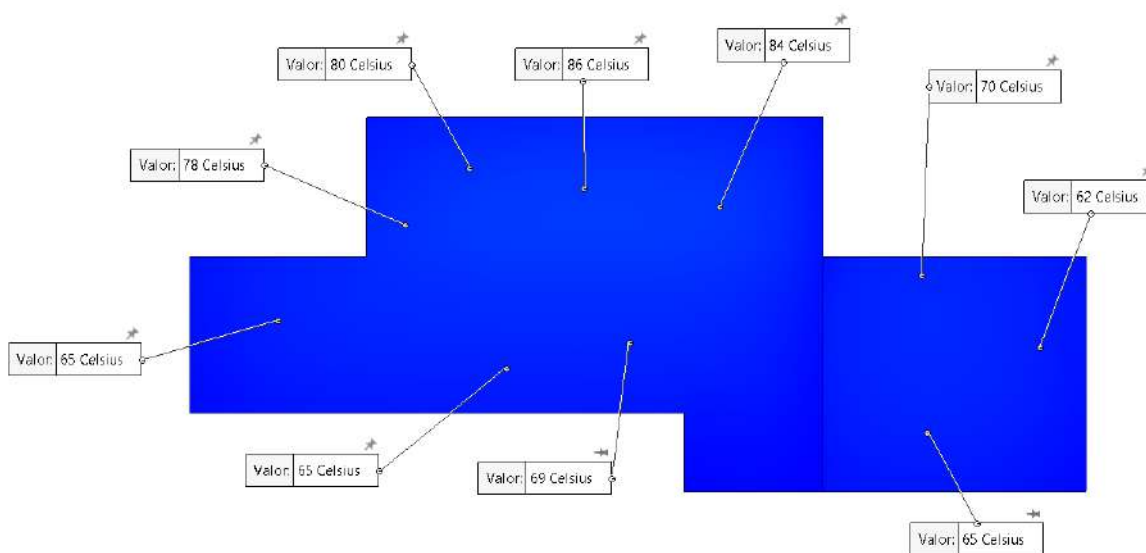


Imagen 49 Mediciones en cara fría, vista lateral. Elaboración propia

Con esto, se concluye la primera propuesta, la cual ha sido elaborada teniendo en cuenta las consideraciones actuales del cliente. Para más información sobre esta propuesta, consultar los planos en la sección “Anexos”.

#### 4.1.6 Representación de esquemas 2 (cambio de materiales)

Dado que se trata del mismo diseño y solo se cambian los materiales por los que se han seleccionado en el punto 3.1.4, es posible omitir algunos pasos y proceder directamente a calcular la cantidad de material.

Para conocer que material sustituye a cuál, se elabora una tabla comparativa en Excel para tener una mejor visualización:

Tabla 19 Nuevos materiales

| MATERIAL                    |                             |
|-----------------------------|-----------------------------|
| CLIENTE                     | PROPUESTO                   |
| AISLANTE 1                  | AISLANTE 1 (MICROPOROSO)    |
| AISLANTE 2                  | AISLANTE 2 (FIBRA CERÁMICA) |
| REFRACTARIO 1 (15% ALÚMINA) | REFRACTARIO 2 (15% ALÚMINA) |
| AISLANTE 3                  | AISLANTE 2 (FIBRA CERÁMICA) |
| REFRACTARIO 2 (70% ALÚMINA) | REFRACTARIO 1 (60% ALÚMINA) |
| REFRACTARIO 3 (60% ALÚMINA) | REFRACTARIO 1 (60% ALÚMINA) |
| REFRACTARIO 4 (65% ALÚMINA) | REFRACTARIO 1 (60% ALÚMINA) |
| REFRACTARIO 5 (50% SÍLICE)  | REFRACTARIO 1 (60% ALÚMINA) |

A estos materiales nuevos se les asigna un color para facilitar su identificación en los planos de diseño.

Tabla 20 Colores de materiales

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| AISLANTE 1                  |  |
| AISLANTE 2                  |  |
| REFRACTARIO 2 (15% ALÚMINA) |  |
| REFRACTARIO 1 (60% ALÚMINA) |  |

#### 4.1.7 Desarrollo de detalles 2

De igual manera es necesario buscar las fichas técnicas de estos nuevos materiales, extrayendo datos como presentación, densidad y conductividad térmica y colocarlos en una tabla de Excel. Los nuevos datos se muestran a continuación:

Tabla 21 Datos técnicos de los nuevos materiales

| MATERIAL      | LARGO (m) | ANCHO (m) | ÁREA (m2)  | DENSIDAD (kg/m3) |
|---------------|-----------|-----------|------------|------------------|
| AISLANTE 1    | 1.22      | 0.61      | 0.7442     | 320              |
| AISLANTE 2    | 0.6096    | 0.9144    | 0.55741824 | 256              |
| REFRACTARIO 2 | -         | -         | -          | 320              |
| REFRACTARIO 1 | -         | -         | -          | 2510             |

Se repite el mismo procedimiento mencionado en el punto 3.5.4.2 para realizar el cálculo de cantidad de material. Considerando los nuevos datos y las presentaciones de estos.

Tras haber hecho los cálculos correspondientes se llega a los siguientes resultados:

Tabla 22 Cantidad de material de segunda propuesta

| MATERIAL                    |                             | CANTIDAD |     |
|-----------------------------|-----------------------------|----------|-----|
| CLIENTE                     | PROPUESTO                   |          |     |
| AISLANTE 1                  | AISLANTE 1                  | 37       | PZA |
| AISLANTE 2                  | AISLANTE 2                  | 56       | PZA |
| REFRACTARIO 1 (15% ALÚMINA) | REFRACTARIO 2 (15% ALÚMINA) | 64       | KG  |
| AISLANTE 3                  | AISLANTE 2                  | 14       | PZA |
| REFRACTARIO 2 (70% ALÚMINA) | REFRACTARIO 1 (60% ALÚMINA) | 5173     | KG  |
| REFRACTARIO 3 (60% ALÚMINA) | REFRACTARIO 1 (60% ALÚMINA) | 1256     | KG  |
| REFRACTARIO 4 (65% ALÚMINA) | REFRACTARIO 1 (60% ALÚMINA) | 2762     | KG  |
| REFRACTARIO 5 (50% SÍLICE)  | REFRACTARIO 1 (60% ALÚMINA) | 1808     | KG  |

#### 4.1.8 Análisis Térmico

Para esta propuesta, es necesario actualizar los materiales de los que se encuentran formadas las piezas del horno, para que este cuente con la conductividad térmica adecuada. Se consideran las mismas condiciones iniciales para este análisis:

Tabla 23 Variables análisis térmico

| CONDICIÓN                 | VALOR | UNIDAD             |
|---------------------------|-------|--------------------|
| TEMPERATURA AMBIENTE      | 28    | °C                 |
| TEMPERATURA INTERNA       | 1,000 | °C                 |
| COEFICIENTE DE CONVECCIÓN | 15    | W/m <sup>2</sup> K |

Se ejecuta el análisis y se obtiene el siguiente resultado:

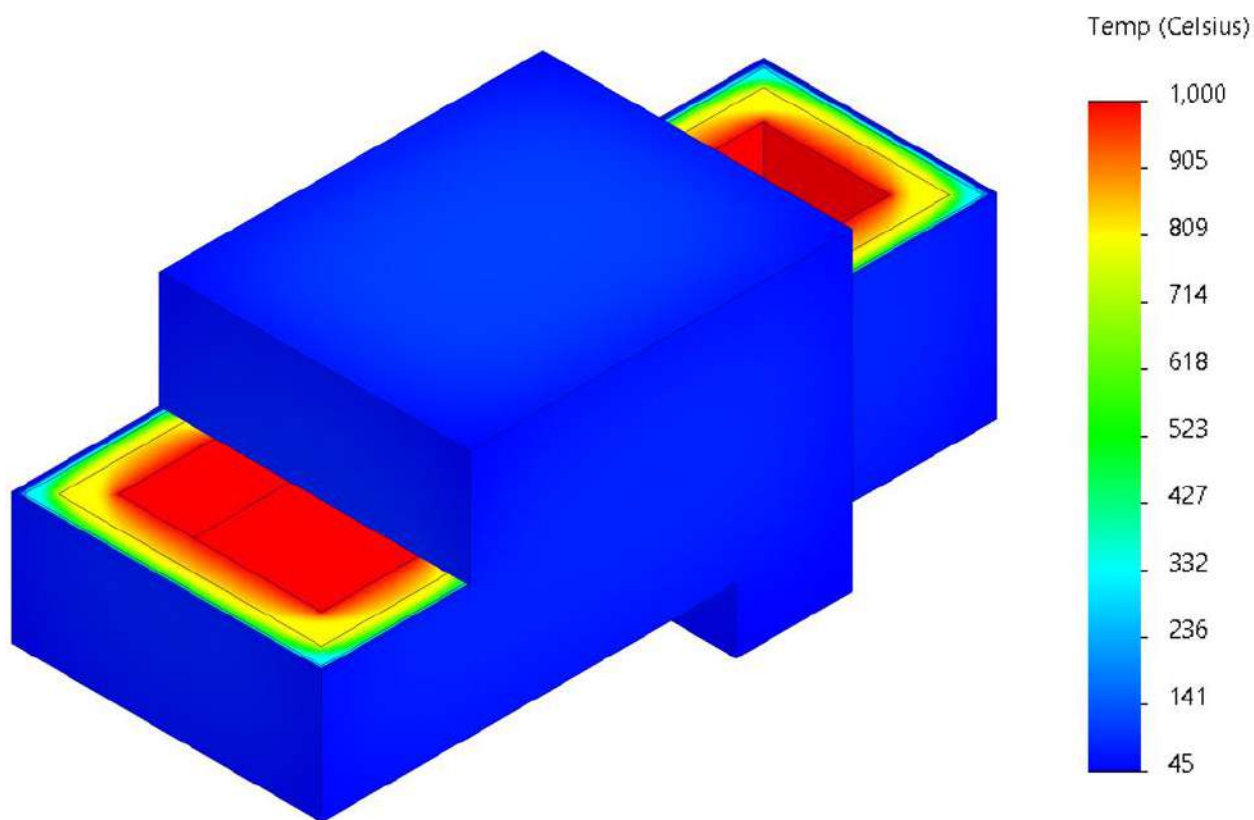
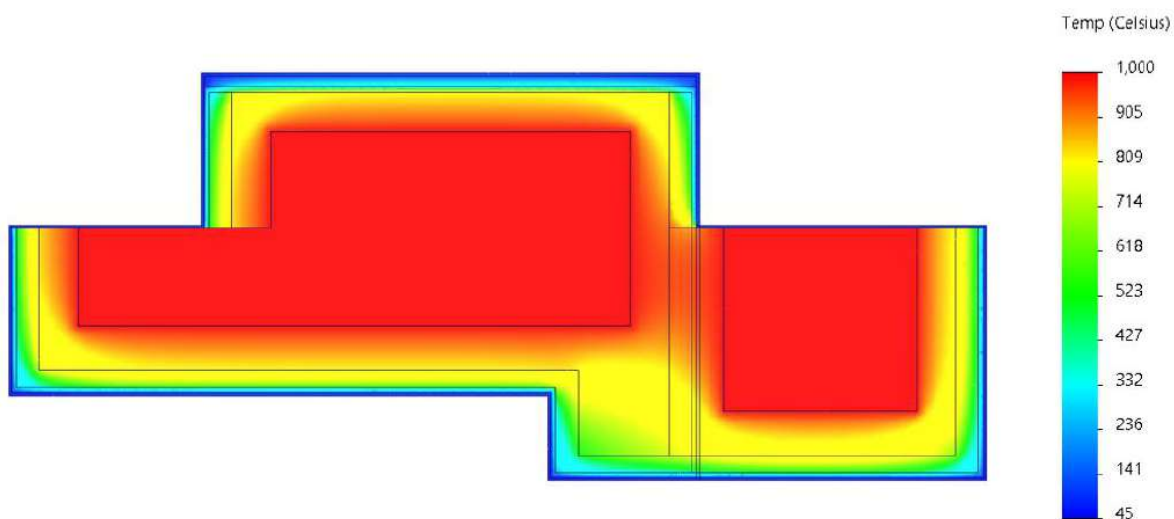
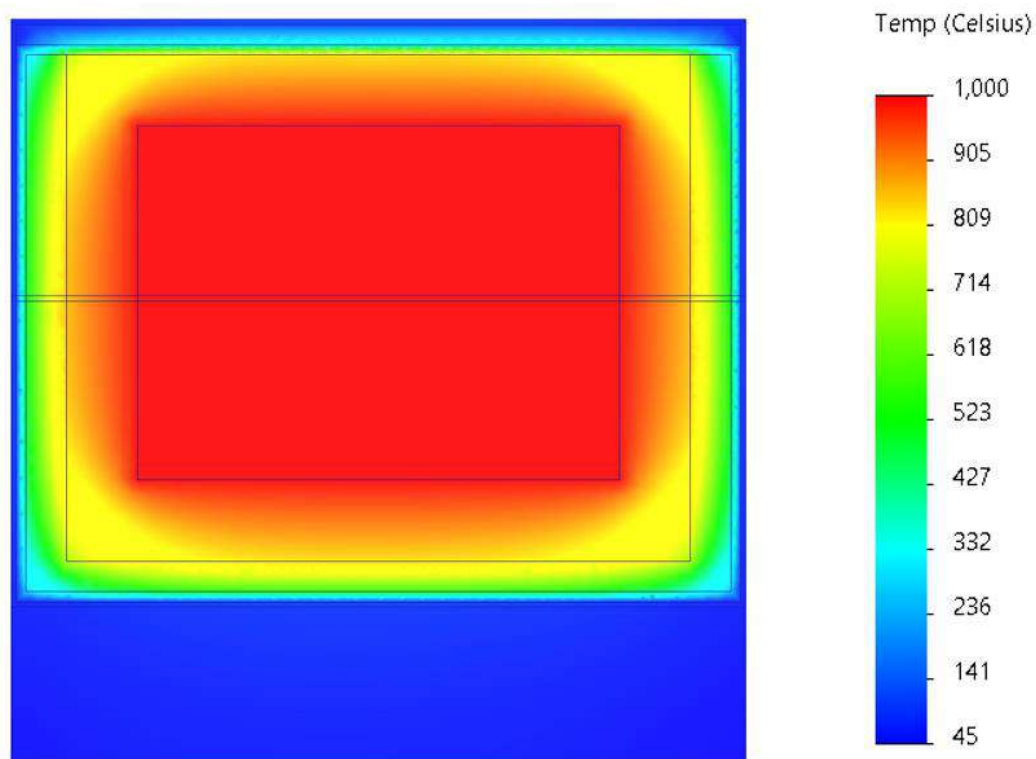


Imagen 50 Resultado de análisis, vista isométrica. Elaboración propia



*Imagen 51 Resultado de análisis, corte lateral. Elaboración propia*



*Imagen 52 Resultado de análisis, corte frontal. Elaboración propia*

Para conocer la variación de la temperatura, es necesario realizar diversas mediciones a lo largo de las superficies internas y externas del horno.

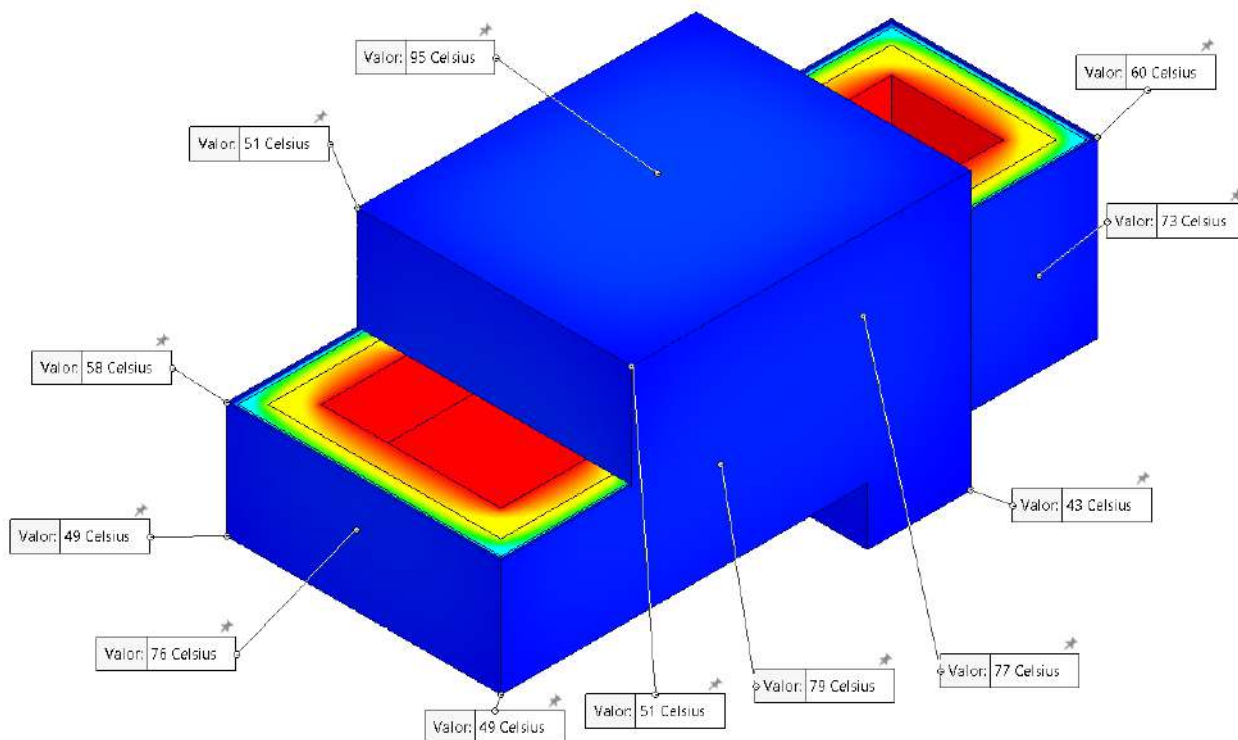


Imagen 53 Mediciones en cara fría, vista isométrica. Elaboración propia

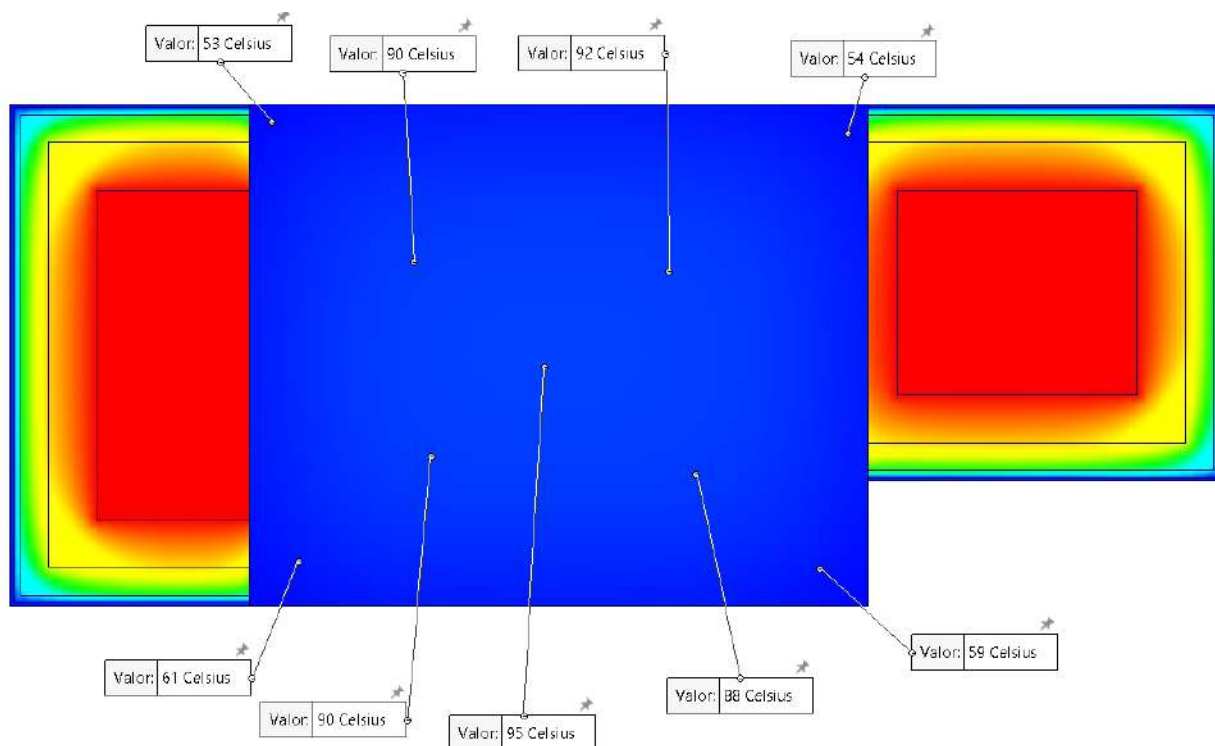
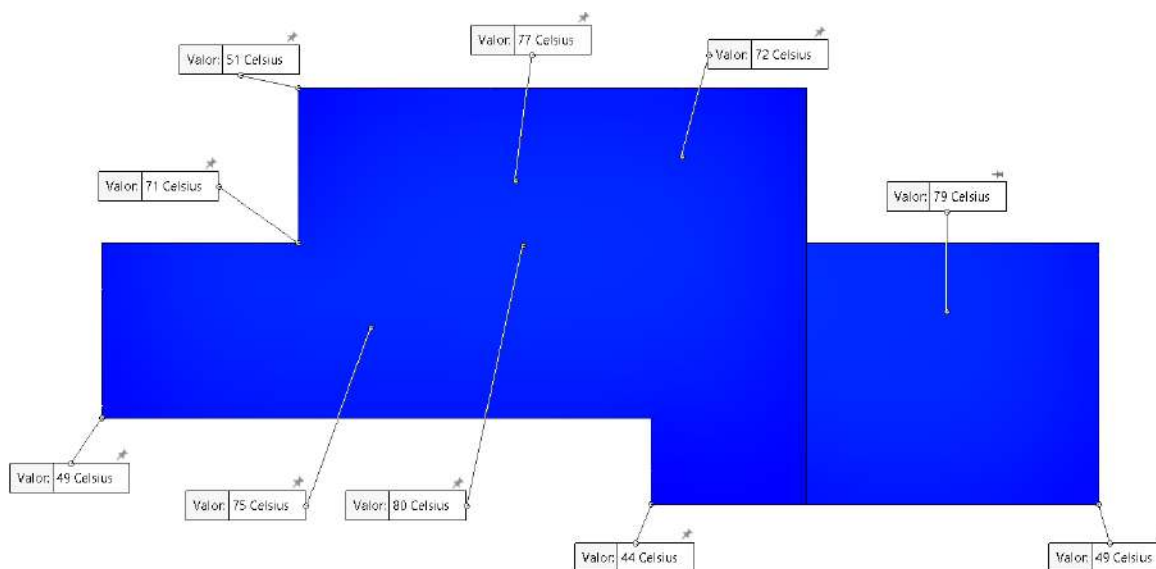


Imagen 54 Mediciones en cara fría, vista superior. Elaboración propia



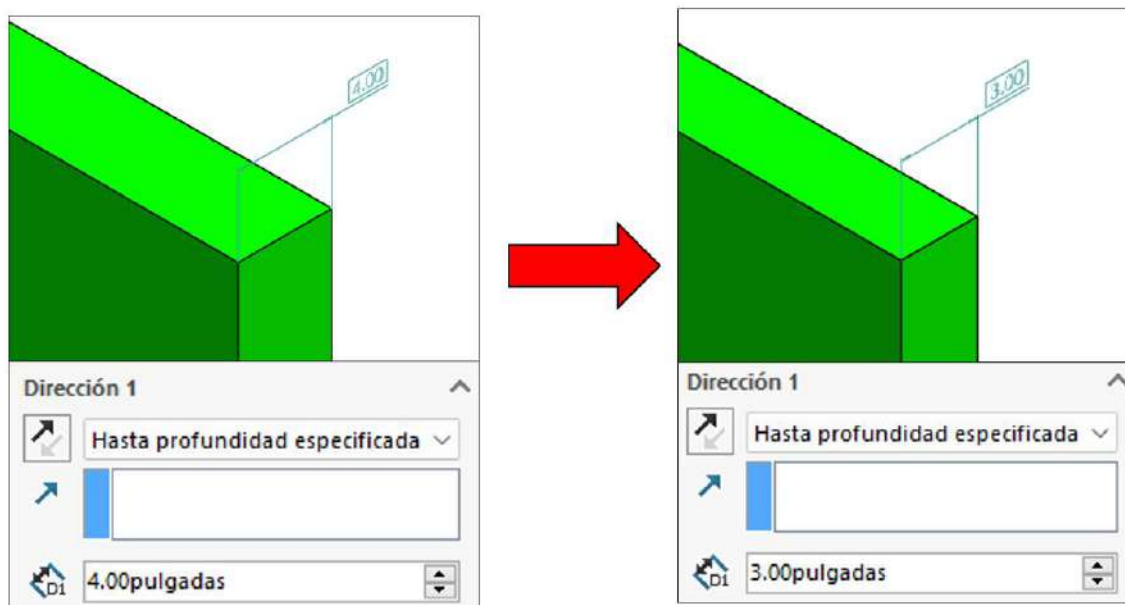
*Imagen 55 Mediciones en cara fría, vista lateral. Elaboración propia*

Los resultados obtenidos se comparan más adelante para facilitar la elección de la mejor propuesta. Para más consultar los planos en la sección “Anexos”.

#### 4.1.9 Representación de esquemas 3 (reducción de espesor)

Esta segunda propuesta de rediseño tiene como característica principal el uso de los materiales propuestos, pero con la particularidad de reducir el ancho del material refractario de todas las paredes en 1 pulgada. Al igual que en las anteriores, se realiza el cálculo de la cantidad de material necesario para la construcción del horno, así como un análisis térmico para evaluar el impacto de este cambio en el rendimiento del horno.

Para esto, se toma como base el modelo utilizado en las dos propuestas anteriores y solo se ajusta la distancia de extrusión en las piezas refractarias. Tal como se muestra en la siguiente imagen:



*Imagen 56 Ejemplo de reducción de espesor*

Esto no debe ser realizado en todas las piezas del diseño, ya que provocaría errores en el desarrollo de la propuesta; únicamente debe ser aplicado en aquellas piezas de material refractario que se encuentren al interior del horno.

#### 4.1.10 Desarrollo de detalles 3

Este nuevo cálculo aprovecha algunos de los datos obtenidos en la propuesta anterior, específicamente los datos de área para cada una de las piezas aislantes y el volumen de los refractarios que no estén directamente al interior del horno. Solo es necesario realizar un nuevo cálculo de volumen para las piezas a las que se les haya reducido el espesor. En la siguiente tabla se muestran los nuevos valores:



Tabla 24 Nueva volumetría

| ## | MATERIAL            | ÁREA (m <sup>2</sup> ) | VOLUMEN (m <sup>3</sup> ) |
|----|---------------------|------------------------|---------------------------|
| 1  | REFRACTARIO 2       | 4.09                   | 0.62                      |
| 2  | REFRACTARIO 1       | 4.09                   | 0.2                       |
| 3  | AISLANTE 1          | 4.09                   | 0.1                       |
|    |                     |                        |                           |
| 4  | AISLANTE 1          | 0.8                    | 0.04                      |
| 5  | AISLANTE 2          | 0.68                   | 0.14                      |
| 6  | REFRACTARIO 1       | 0.68                   | 0.22                      |
|    |                     |                        |                           |
| 7  | AISLANTE 1          | 0.96                   | 0.04                      |
| 8  | AISLANTE 2          | 0.96                   | 0.2                       |
| 9  | REFRACTARIO 1       | 0.72                   | 0.24                      |
|    |                     |                        |                           |
| 10 | AISLANTE 1          | 1.33                   | 0.03                      |
| 11 | AISLANTE 2          | 1.02                   | 0.1                       |
| 12 | REFRACTARIO 1       | -                      | 0.14                      |
| 13 | REFRACTARIO 1 CENT. | -                      | 0.82                      |
|    |                     |                        |                           |
| 14 | AISLANTE 1          | 4.1                    | 0.1                       |
| 15 | AISLANTE 1          | 2.61                   | 0.07                      |
| 16 | AISLANTE 2          | 1.82                   | 0.36                      |
| 17 | REFRACTARIO 1       | -                      | 0.4                       |
|    |                     |                        |                           |
| 18 | AISLANTE 1          | 1.46                   | 0.04                      |
| 19 | AISLANTE 2          | 1.36                   | 0.14                      |
| 20 | REFRACTARIO 1       | 0.92                   | 0.14                      |
|    |                     |                        |                           |
| 21 | AISLANTE 1          | 1.35                   | 0.03                      |
| 22 | AISLANTE 2          | 1.1                    | 0.22                      |
| 23 | REFRACTARIO 1       | 0.74                   | 0.24                      |
|    |                     |                        |                           |
| 24 | AISLANTE 1          | 4.3                    | 0.11                      |
| 25 | AISLANTE 2          | 4.94                   | 0.38                      |
| 26 | REFRACTARIO 4       | 4.21                   | 0.46                      |
|    |                     |                        |                           |
| 27 | AISLANTE 1          | 1.58                   | 0.04                      |
| 28 | AISLANTE 2          | 1.52                   | 0.12                      |
| 29 | REFRACTARIO 1       | 1.17                   | 0.16                      |

Dado que se utilizan los mismos materiales que en la propuesta anterior, no es necesario buscar nuevas fichas técnicas. Se emplean los mismos datos técnicos obtenidos y únicamente se realiza el proceso de cálculo de material acorde al punto 3.5.4.2. En la siguiente tabla se muestran las nuevas cantidades obtenidas:

Tabla 25 Cantidad de material propuesta 3

| MATERIAL                    |                             | CANTIDAD |     |
|-----------------------------|-----------------------------|----------|-----|
| CLIENTE                     | PROPUESTO                   |          |     |
| AISLANTE 1                  | AISLANTE 1 (FIBRA CERÁMICA) | 37       | PZA |
| AISLANTE 2                  | AISLANTE 2 (FIBRA CERÁMICA) | 56       | PZA |
| REFRACTARIO 1 (15% ALÚMINA) | REFRACTARIO 2 (15% ALÚMINA) | 64       | KG  |
| AISLANTE 3                  | AISLANTE 2 (FIBRA CERÁMICA) | 14       | PZA |
| REFRACTARIO 2 (70% ALÚMINA) | REFRACTARIO 1 (60% ALÚMINA) | 4370     | KG  |
| REFRACTARIO 3 (60% ALÚMINA) | REFRACTARIO 1 (60% ALÚMINA) | 1156     | KG  |
| REFRACTARIO 4 (65% ALÚMINA) | REFRACTARIO 1 (60% ALÚMINA) | 1557     | KG  |
| REFRACTARIO 5 (50% SÍLICE)  | REFRACTARIO 1 (60% ALÚMINA) | 1557     | KG  |

#### 4.1.11 Análisis térmico

No es necesario realizar alguna acción adicional ya que se trata de los mismos materiales que la propuesta anterior. De igual manera, las condiciones utilizadas serán las mismas que se han estado utilizando, las cuales son:

Tabla 26 Variables análisis térmico

| CONDICIÓN                 | VALOR | UNIDAD             |
|---------------------------|-------|--------------------|
| TEMPERATURA AMBIENTE      | 28    | °C                 |
| TEMPERATURA INTERNA       | 1,000 | °C                 |
| COEFICIENTE DE CONVECCIÓN | 15    | W/m <sup>2</sup> K |

Se ejecuta el análisis y se obtiene el siguiente resultado:

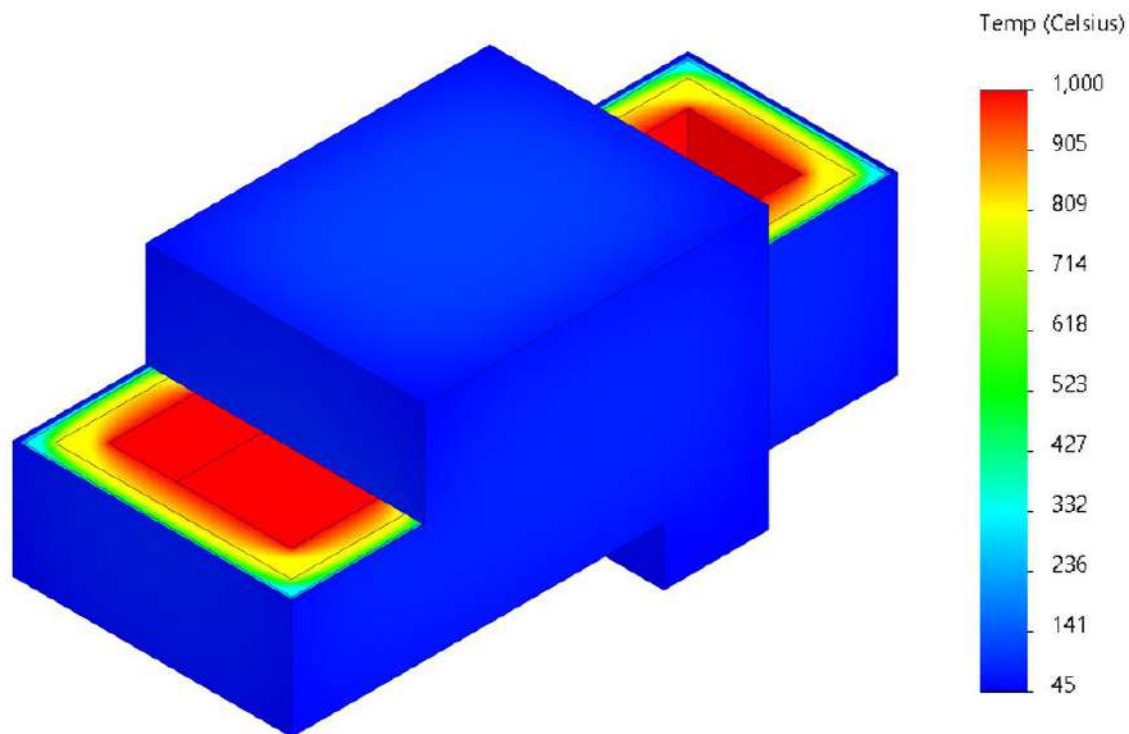


Imagen 57 Resultado de análisis, vista isométrica. Elaboración propia

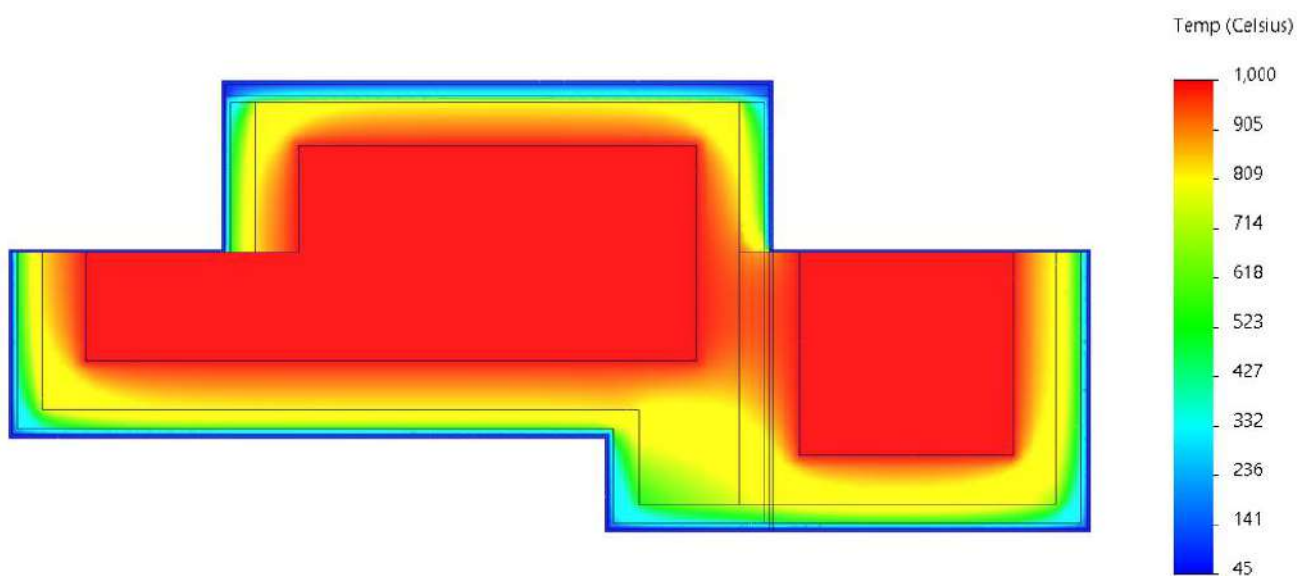


Imagen 58 Resultado de análisis, corte lateral. Elaboración propia

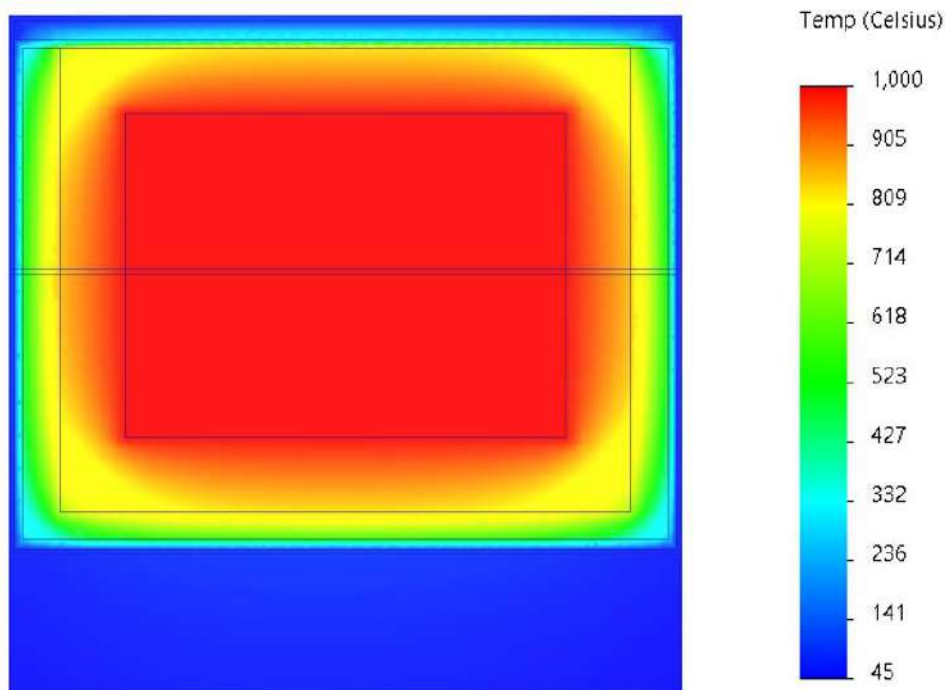


Imagen 59 Resultado de análisis, corte frontal. Elaboración propia

Se realizan mediciones a lo largo del modelo para comprender como afecta el cambio de espesor en la temperatura presente en la cara fría:

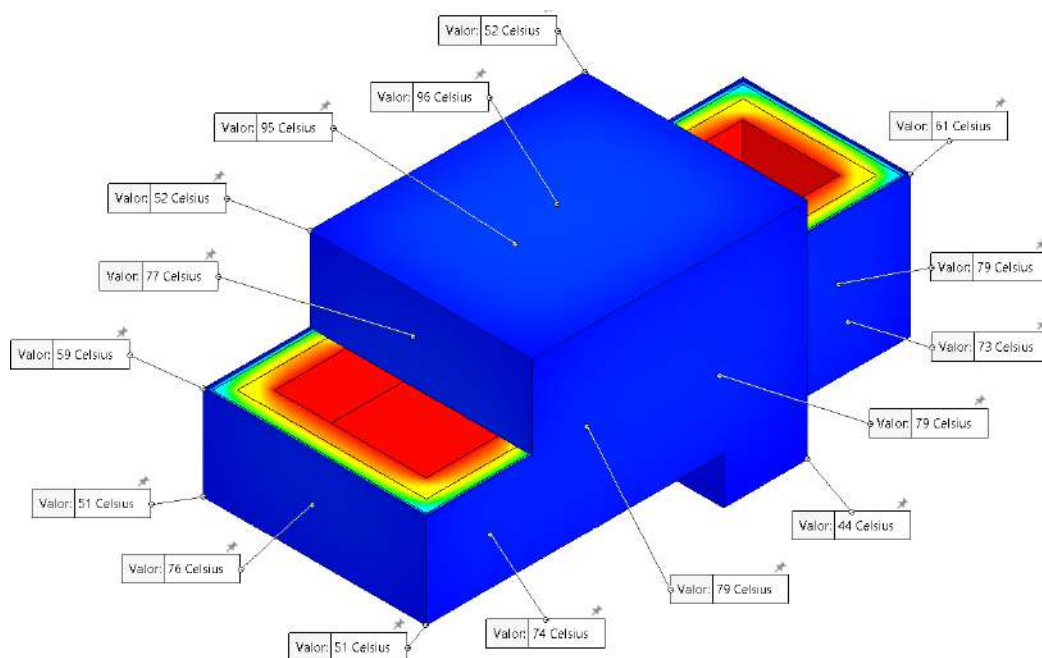


Imagen 60 Mediciones en cara fría, vista isométrica. Elaboración propia

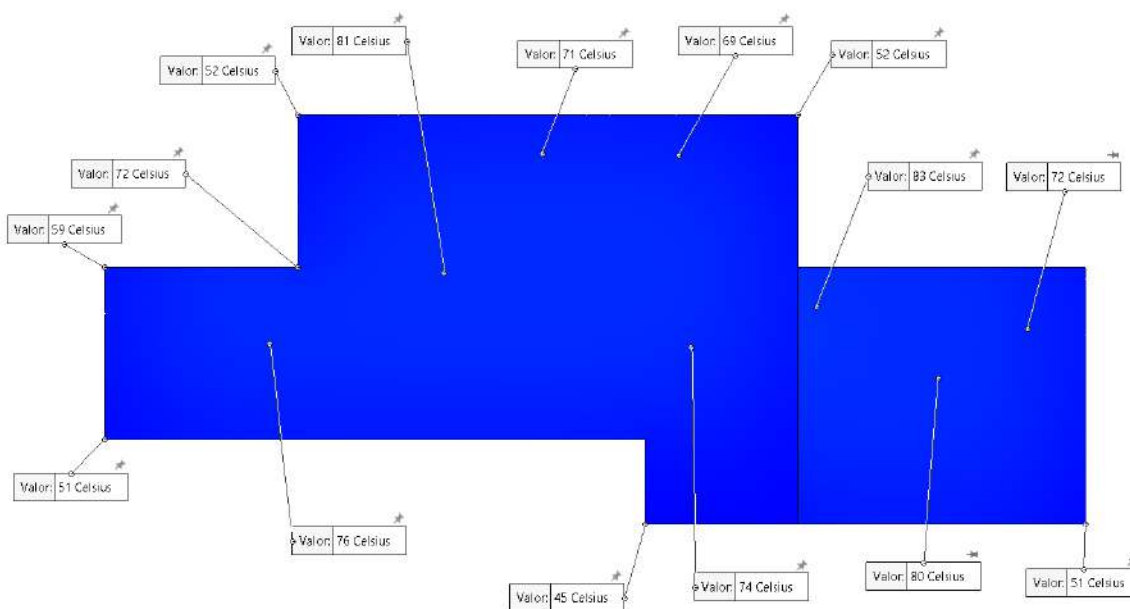


Imagen 61 Mediciones en cara fría, vista lateral. Elaboración propia

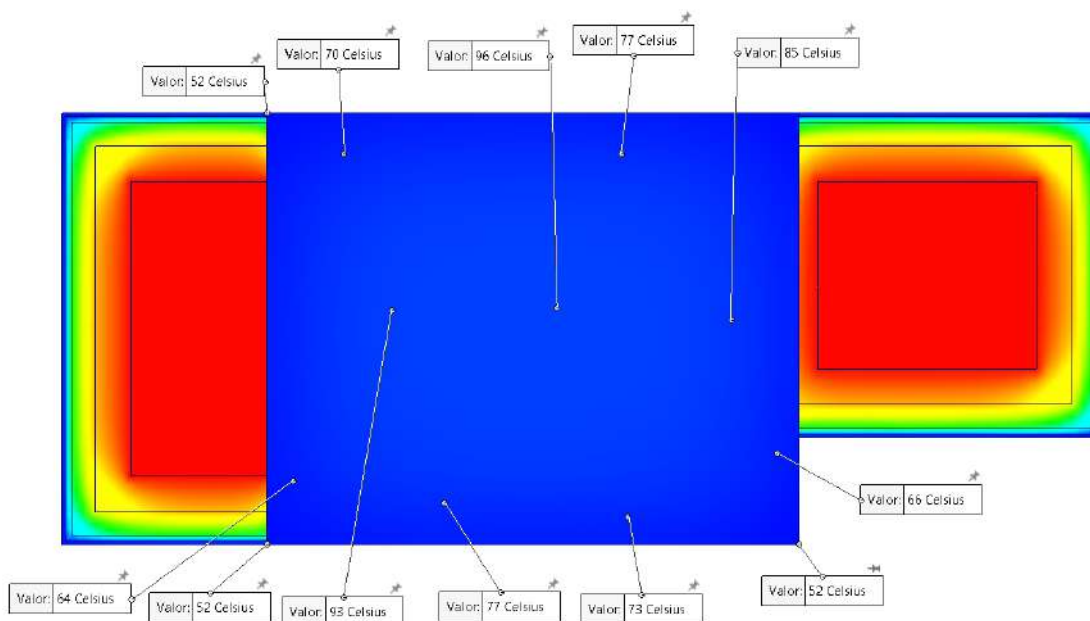


Imagen 62 Mediciones en cara fría, vista superior. Elaboración propia

Tras haber realizado todas las fases de la metodología establecida, se realiza una fase final donde se analiza la información obtenida y se emite una conclusión acerca de la que sea la mejor propuesta.



#### **4.1.12 Interpretación de los resultados**

Al cambiar los materiales y mantener el espesor original, se ahorran cerca de 200 kg de concreto refractario y se utilizan 4 placas menos de aislante 1. En comparación con la propuesta que usa materiales originales.

Al reducir el espesor del refractario en 1 pulgada a la propuesta con nuevos materiales, la cantidad de concreto refractario se reduce en 2,359 kg, comparado con la propuesta que cambia materiales y mantiene el espesor.

La variación de temperatura entre la propuesta con materiales originales y la propuesta con materiales propuestos varía de 3 a 9°C, dependiendo de la zona donde se mida. Al reducir el espesor del refractario en la propuesta que cambia materiales, la temperatura de la cara fría aumenta en promedio 1.5°C.

#### **4.1.13 Conclusión**

Los resultados obtenidos de las diversas propuestas demuestran que cambiar los materiales originales es una opción viable de rediseño. Este cambio permite un ahorro significativo en la cantidad de material, lo que no solo reduce los costos de adquisición, sino que también disminuye los costos asociados al traslado e instalación y la mano de obra.

Además, no se observa un aumento significativo en la temperatura de la cara fría, por lo que el ambiente de trabajo no se volverá incómodo para el personal.

Por otra parte, aunque la reducción del espesor de la capa refractaria de material propuesto permite un ahorro adicional en la cantidad de material, se produce un incremento en la temperatura de la cara fría. Por lo tanto, esta propuesta deberá ser evaluada en detalle por el departamento correspondiente de la empresa cliente.

La decisión final sobre qué propuesta utilizar recae en el cliente. No obstante, se sugiere considerar particularmente la opción que utiliza los nuevos materiales propuestos y mantiene el espesor original, debido a sus beneficios en términos de ahorro de costos y mantenimiento del confort térmico.

## 4.2 Horno de fundición tipo túnel reverbero con bahía de recirculación 2

### 4.2.1 Análisis del problema

Este horno pertenece a la empresa EMERSON MOTOR ubicada en Russellville, Kentucky, Estados Unidos. Se aplica la metodología desarrollada para la obtención de los datos necesarios para sustentar las propuestas que serán presentadas al cliente. La empresa ha proporcionado un plano del cual se ha extraído la siguiente información:

1.- Se han obtenido las medidas de las siguientes secciones externas.

*Tabla 27 Medias obtenidas*

| MEDIDAS                    |
|----------------------------|
| ALTURA                     |
| LONGITUD                   |
| ANCHO                      |
| ALTURA DEL TANQUE          |
| ALTURA DEL DIP             |
| LONGITUD DEL POZO DE CARGA |
| LONGITUD DEL DIP           |

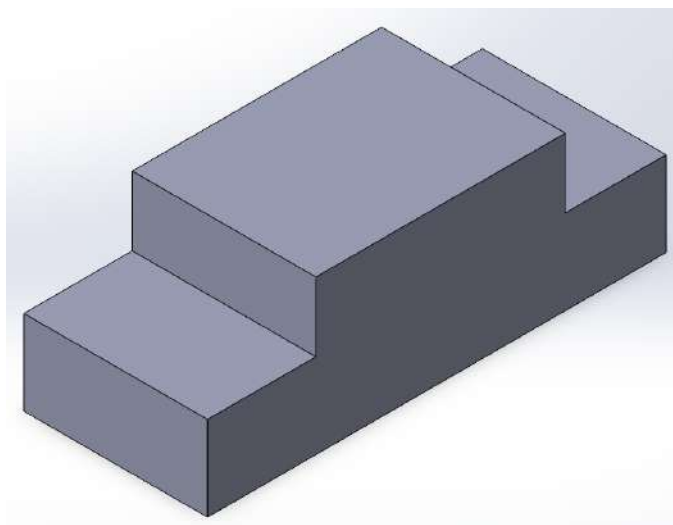
2.- Los materiales utilizados para el revestimiento interno

*Tabla 28 Materiales originales*

| TIPO                        |
|-----------------------------|
| AISLANTE 1                  |
| AISLANTE 2                  |
| REFRACTARIO 1 (15% ALÚMINA) |
| REFRACTARIO 2 (65% ALÚMINA) |
| REFRACTARIO 3 (88% ALÚMINA) |
| REFRACTARIO 4 (54% ALÚMINA) |

## 4.2.2 Diseño conceptual

Con la información obtenida se diseña un bosquejo inicial que funciona como base para el desarrollo de las fases consiguientes, dicho modelo se muestra en la siguiente imagen:



*Imagen 63 Diseño inicial*

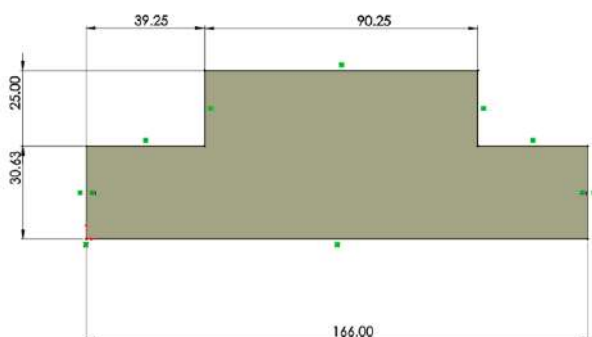
## 4.2.3 Representación de esquemas 1

Se asignan colores a cada uno de los materiales que conforman el revestimiento térmico, los cuales deben ser asignados en sus respectivas piezas diseñadas. Estos colores mejoran la estética del horno y facilitan la identificación de piezas. Los colores utilizados en este diseño se muestran en la siguiente tabla:

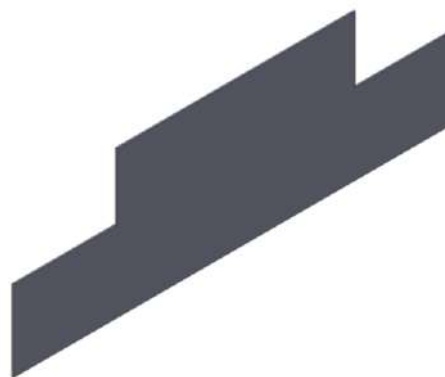
*Tabla 29 Colores de materiales*

| MATERIAL                    | ###                                                                                  |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| AISLANTE 1                  |  |
| AISLANTE 2                  |  |
| REFRACTARIO 1 (15% ALÚMINA) |  |
| REFRACTARIO 2 (65% ALÚMINA) |  |
| REFRACTARIO 3 (88% ALÚMINA) |  |
| REFRACTARIO 4 (54% ALÚMINA) |  |

Tras definir los colores se comienza a diseñar cada una de las piezas a utilizar, respetando la configuración de uniones del punto 3.1.4.5 y siguiendo el procedimiento definido en el punto 3.3.

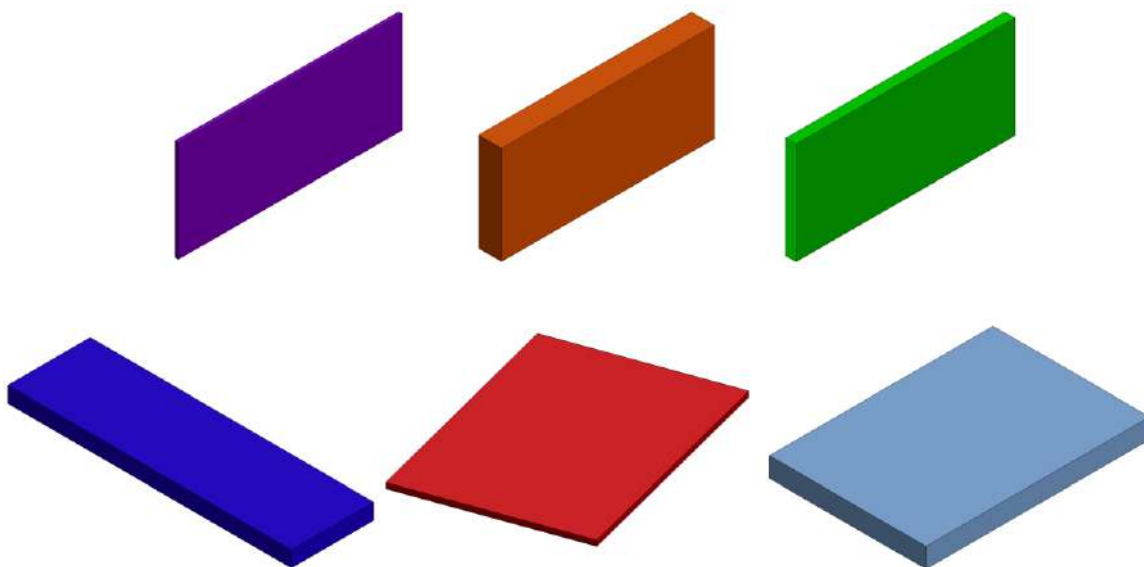


*Imagen 64 Croquis ejemplo*



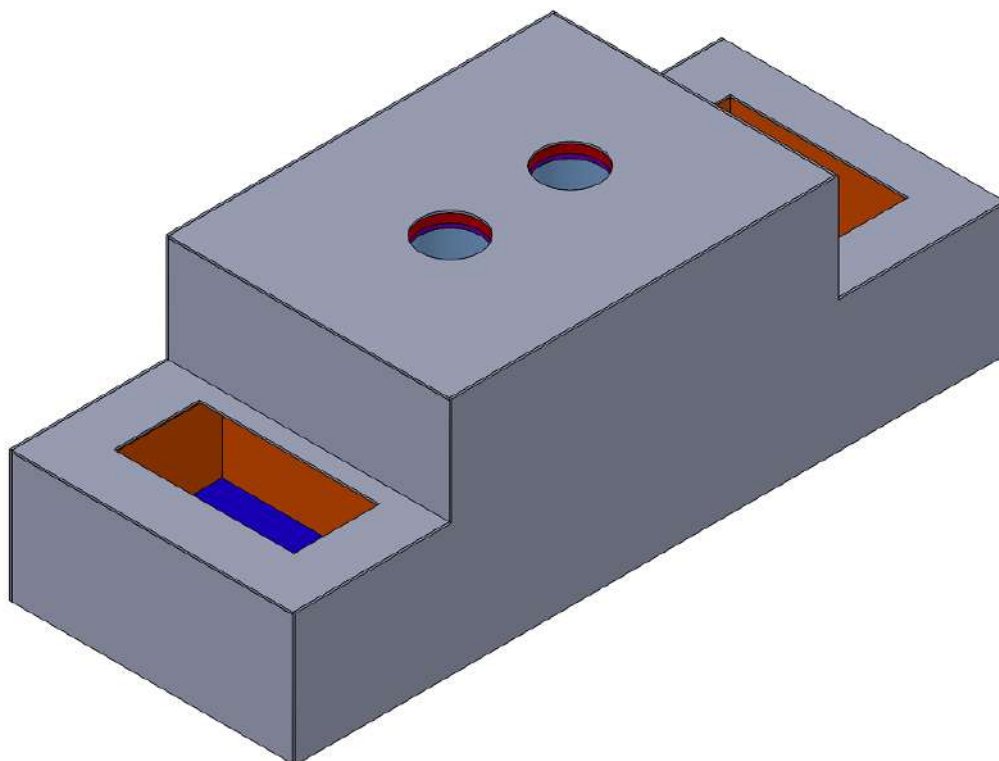
*Imagen 65 Pieza final*

Este proceso es repetido para todas las piezas necesarias que conforman el ensamblaje, asegurando que cada componente se ajuste correctamente. Algunas piezas diseñadas se muestran a continuación.



*Imagen 66 Piezas diseñadas*

Teniendo todas las piezas modeladas, estas deben ser ensambladas siguiendo el proceso mostrado en el punto 3.5.3.2. El ensamblaje final se muestra a continuación:

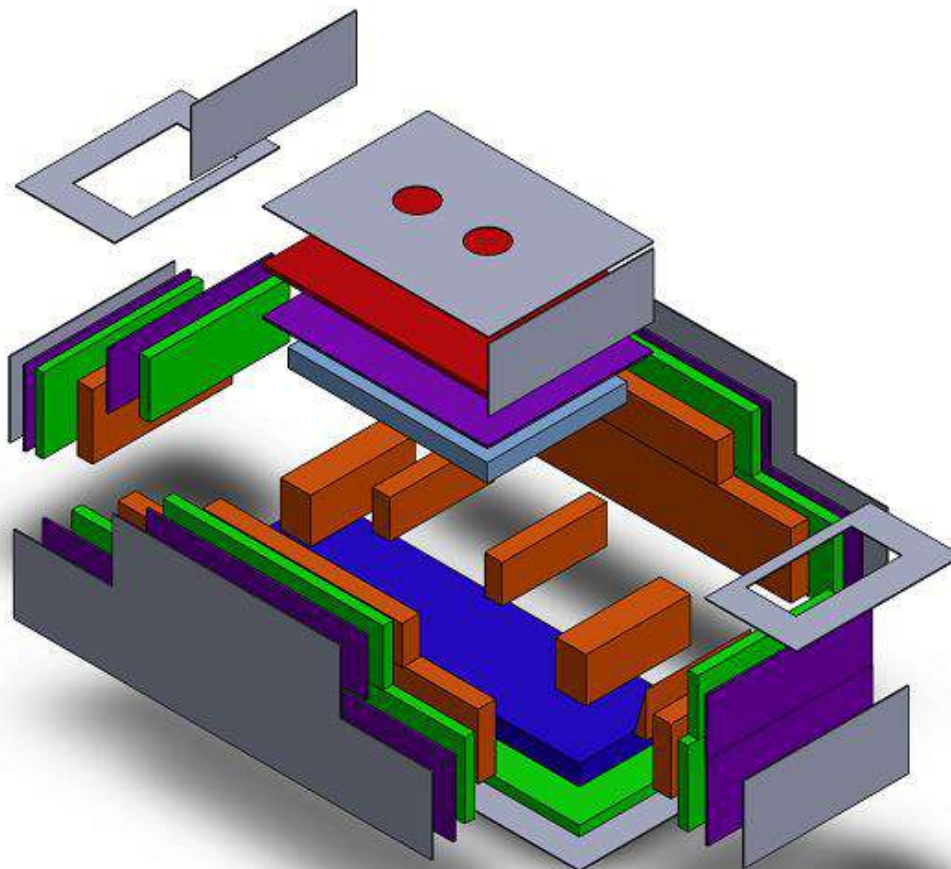


*Imagen 67 Ensamble final, vista isométrica. Elaboración propia*



*Imagen 68 Vistas superior, frontal y lateral. Elaboración propia*

Una vez que el ensamblaje esté completo, se puede crear la vista explosionada utilizando el método descrito en el punto 3.5.3.3. La vista explosionada utilizada en este ensamble es la siguiente:



*Imagen 69 Vista explosionada. Elaboración propia*

#### **4.2.4 Desarrollo de detalles 1**

A continuación, se realiza la obtención del área y volumen de cada pieza, conforme a lo descrito en el punto 3.5.4.1. Los datos obtenidos deben ser anotados en una tabla de Excel para su mejor manejo.



Tabla 30 Resultados de volumetría

| #  | MATERIAL                  | ÁREA<br>(m <sup>2</sup> ) | VOLUMEN<br>(m <sup>3</sup> ) |
|----|---------------------------|---------------------------|------------------------------|
| 1  | REFRACTARIO 1             | 3.77                      | 0.19                         |
| 2  | AISLANTE 1                | 3.77                      | 0.1                          |
| 3  | REFRACTARIO 4             | 2.84                      | 0.5                          |
|    |                           |                           |                              |
| 4  | AISLANTE 1                | 1.23                      | 0.03                         |
| 5  | AISLANTE 2                | 1.23                      | 0.13                         |
| 6  | REFRACTARIO 3             | 0.76                      | 0.14                         |
|    |                           |                           |                              |
| 7  | AISLANTE 1                | 0.93                      | 0.02                         |
| 8  | AISLANTE 2                | 0.78                      | 0.08                         |
| 9  | REFRACTARIO 3             | 0.4                       | 0.07                         |
|    |                           |                           |                              |
| 10 | AISLANTE 1                | 3.11                      | 0.08                         |
| 11 | AISLANTE 2                | 2.98                      | 0.3                          |
| 12 | REFRACTARIO 3             | 2.36                      | 0.42                         |
| 13 | REFRACTARIO 3<br>CENT.1-2 | 0.47                      | 0.14                         |
|    |                           |                           |                              |
| 14 | AISLANTE 1                | 1.25                      | 0.03                         |
| 15 | AISLANTE 2                | 1.21                      | 0.12                         |
| 16 | REFRACTARIO 3             | 0.91                      | 0.16                         |
| 17 | REFRACTARIO 3 TRI.        | 0.47                      | 0.03                         |
|    |                           |                           |                              |
| 18 | AISLANTE 1                | 1.25                      | 0.03                         |
| 19 | AISLANTE 2                | 1.21                      | 0.09                         |
| 20 | REFRACTARIO 3             | 0.91                      | 0.14                         |
|    |                           |                           |                              |
| 21 | AISLANTE 2                | 5.58                      | 0.57                         |
| 22 | REFRACTARIO 2             | 3.82                      | 0.78                         |

Se buscan las fichas técnicas de todos estos materiales y se extraen los datos técnicos requeridos para la elaboración de las siguientes fases.

Tabla 31 Datos técnicos de los materiales

| MATERIAL      | LARGO (m) | ANCHO (m) | ÁREA (m2) | DENSIDAD (kg/m3) |
|---------------|-----------|-----------|-----------|------------------|
| REFRACTARIO 2 | -         | -         | -         | 2590             |
| AISLANTE 2    | 1         | 1.25      | 1.25      | 255              |
| REFRACTARIO 3 | -         | -         | -         | 2840             |
| AISLANTE 1    | 1         | 0.6       | 0.6       | 300              |
| REFRACTARIO 1 | -         | -         | -         | 320              |
| REFRACTARIO 4 | -         | -         | -         | 2470             |

Y mediante el procedimiento mencionado en el punto 3.5.4.2 se obtienen las siguientes cantidades:

Tabla 32 Cantidades de material

| MATERIAL      | CANTIDAD |      |
|---------------|----------|------|
|               | KG       | PZAS |
| REFRACTARIO 2 | 2021     | -    |
| AISLANTE 2    | -        | 16   |
| REFRACTARIO 3 | 5315     | -    |
| AISLANTE 1    | -        | 33   |
| REFRACTARIO 1 | 61       | -    |
| REFRACTARIO 4 | 2470     | -    |

## 4.2.5 Análisis térmico

Se realiza el análisis térmico del modelo para determinar las temperaturas en la cara fría. Se utilizan condiciones de trabajo ideales, las cuales son las siguientes:

Tabla 33 Variables de análisis térmico

| CONDICIÓN                 | VALOR | UNIDAD             |
|---------------------------|-------|--------------------|
| TEMPERATURA AMBIENTE      | 28    | °C                 |
| TEMPERATURA INTERNA       | 1,000 | °C                 |
| COEFICIENTE DE CONVECCIÓN | 15    | W/m <sup>2</sup> K |

El estudio se ejecuta y se obtiene el siguiente resultado:

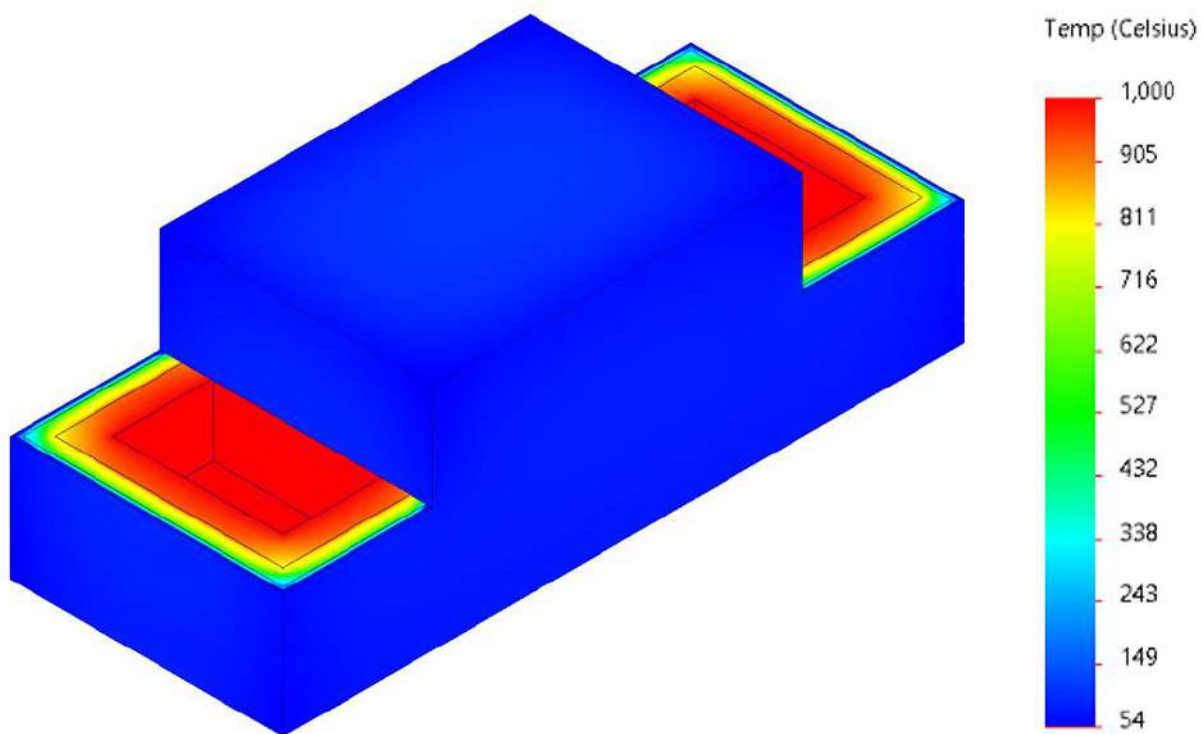


Imagen 70 Resultado de análisis, vista isométrica. Elaboración propia

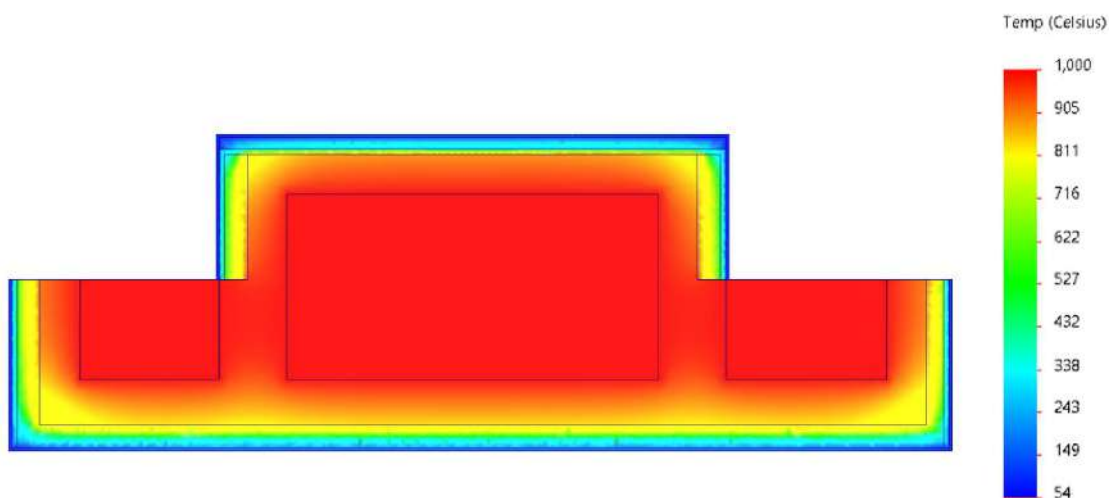


Imagen 71 Resultado de análisis, corte lateral. Elaboración propia

Para conocer la variación de la temperatura es necesario realizar diversas mediciones a lo largo de las superficies internas y externas del horno.

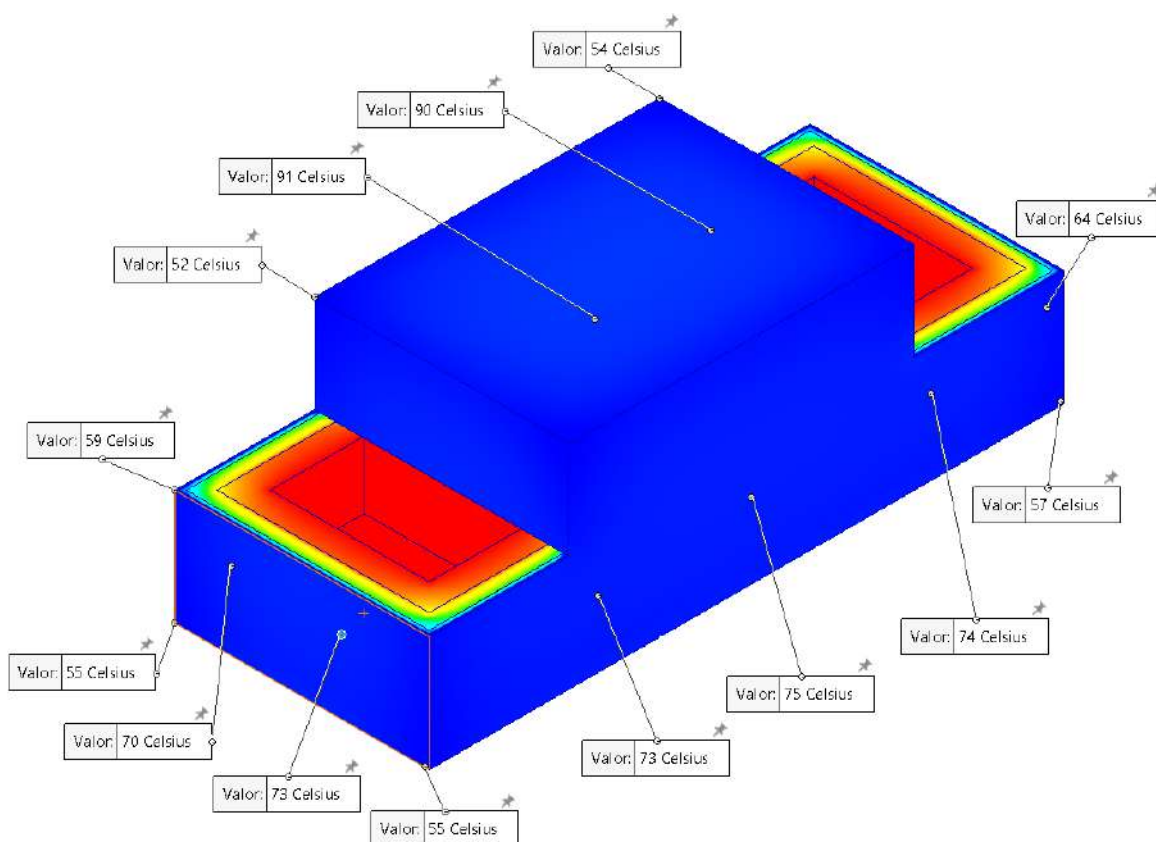


Imagen 72 Mediciones en cara fría, vista isométrica. Elaboración propia

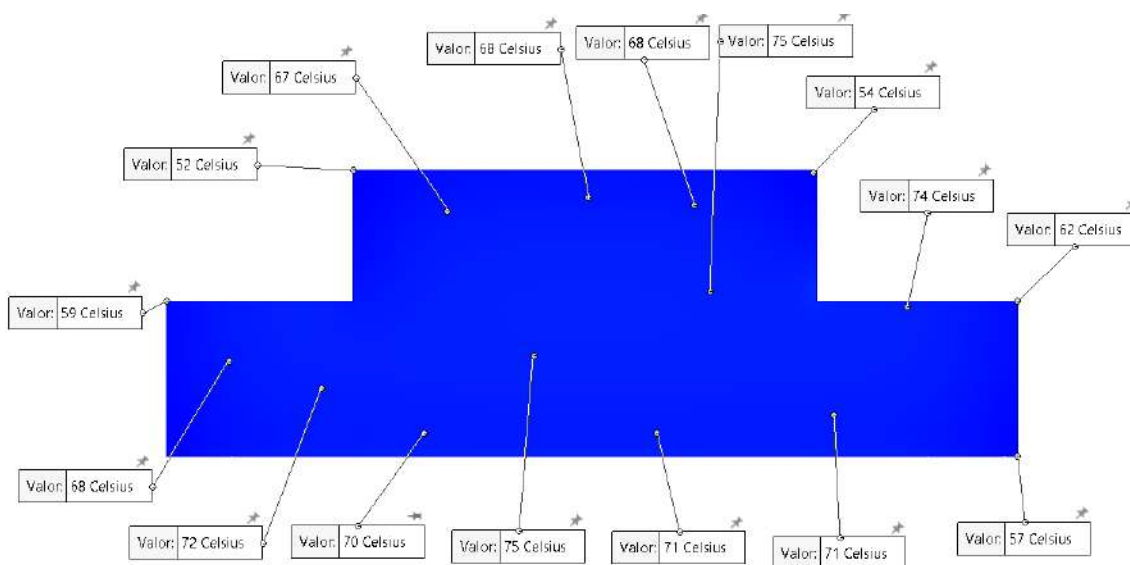


Imagen 73 Mediciones en cara fría, vista lateral. Elaboración propia

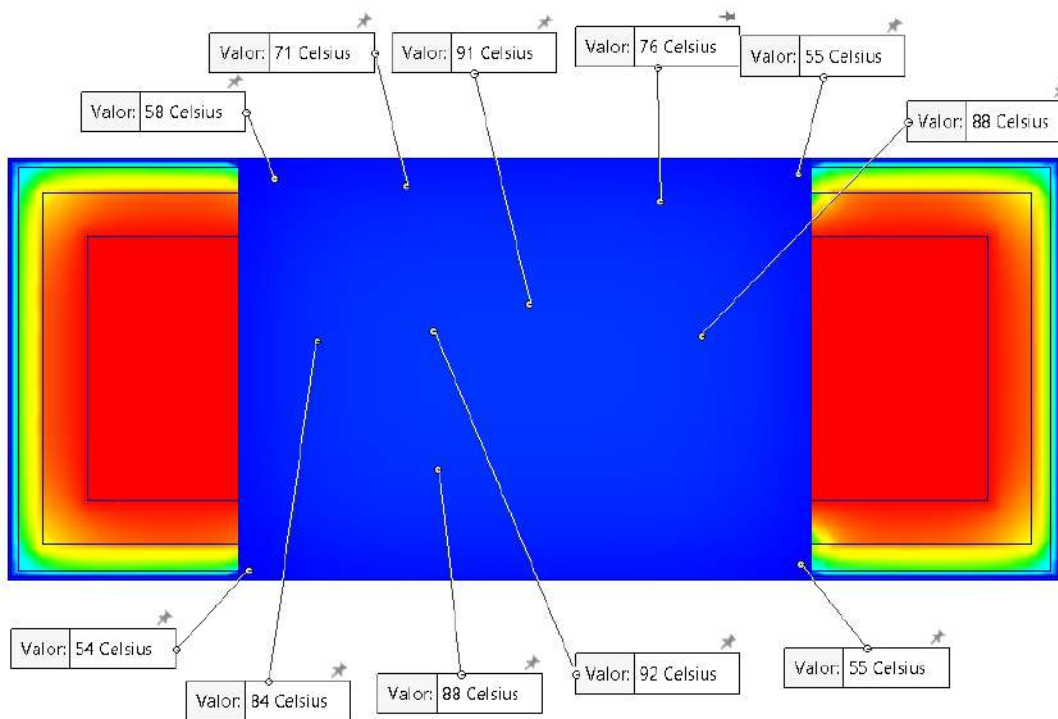


Imagen 74 Mediciones en cara fría, vista superior. Elaboración propia

Con esto concluye la primera propuesta, la cual ha sido elaborada teniendo en cuenta las consideraciones actuales del cliente. Para más información sobre esta propuesta, consultar los planos en la sección “Anexos”.

#### 4.2.6 Representación de esquemas 2 (cambio de materiales)

Debido a que solo se cambian los materiales utilizados, es posible utilizar el mismo diseño 3D y así omitir algunos pasos. Se inicia directamente con el cálculo de la cantidad de material, aunque antes es importante tener algunas consideraciones:

1.- Los nuevos materiales se muestran en la siguiente tabla

Tabla 34 Nuevos materiales

| MATERIAL                    |                             |
|-----------------------------|-----------------------------|
| CLIENTE                     | PROPUESTO                   |
| AISLANTE 1                  | AISLANTE 1                  |
| AISLANTE 2                  | AISLANTE 2                  |
| REFRACTARIO 1 (15% ALÚMINA) | REFRACTARIO 1 (15% ALÚMINA) |
| REFRACTARIO 2 (65% ALÚMINA) | REFRACTARIO 2 (60% ALÚMINA) |
| REFRACTARIO 3 (88% ALÚMINA) | REFRACTARIO 2 (60% ALÚMINA) |
| REFRACTARIO 4 (54% ALÚMINA) | REFRACTARIO 2 (60% ALÚMINA) |

2.- Los colores utilizados en estos nuevos materiales son los siguientes;

Tabla 35 Colores de materiales

| MATERIAL                    | ### |
|-----------------------------|-----|
| AISLANTE 1                  |     |
| AISLANTE 2                  |     |
| REFRACTARIO 1 (15% ALÚMINA) |     |
| REFRACTARIO 2 (60% ALÚMINA) |     |

3.- Los datos técnicos de estos materiales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 36 Datos de los materiales

| MATERIAL                    | LARGO (m) | ANCHO (m) | ÁREA (m <sup>2</sup> ) | DENSIDAD (kg/m <sup>3</sup> ) | CONDUCTIVIDAD TERMICA |
|-----------------------------|-----------|-----------|------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| AISLANTE 1                  | 1         | 0.5       | 0.5                    | 320                           | 0.00011464            |
| AISLANTE 2                  | 0.6096    | 0.9144    | 0.55742                | 256                           | 0.00052546            |
| REFRACTARIO 1 (15% ALÚMINA) | -         | -         | -                      | 320                           | 0.000549              |
| REFRACTARIO 2 (60% ALÚMINA) | -         | -         | -                      | 2510                          | 0.00334384            |

## 4.2.7 Desarrollo de detalles 2

Mediante la aplicación del procedimiento de cálculo de material mostrado en el punto 3.5.4.2 se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 37 Cantidades de material

| MATERIAL                    |                             | CANTIDAD | UNIDAD |
|-----------------------------|-----------------------------|----------|--------|
| CLIENTE                     | PROPUESTO                   |          |        |
| AISLANTE 1                  | AISLANTE 1                  | 36       | PZA    |
| AISLANTE 2                  | AISLANTE 2                  | 72       | PZA    |
| REFRACTARIO 1 (15% ALÚMINA) | REFRACTARIO 1 (15% ALÚMINA) | 61       | KG     |
| REFRACTARIO 2 (65% ALÚMINA) | REFRACTARIO 2 (60% ALÚMINA) | 1255     | KG     |
| REFRACTARIO 3 (88% ALÚMINA) | REFRACTARIO 2 (60% ALÚMINA) | 1958     | KG     |
| REFRACTARIO 4 (54% ALÚMINA) | REFRACTARIO 2 (60% ALÚMINA) | 4697     | KG     |

## 4.2.8 Análisis térmico

Se utilizan condiciones ideales para el análisis de este horno, las cuales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 38 Variables de análisis térmico

| CONDICIÓN                 | VALOR | UNIDAD             |
|---------------------------|-------|--------------------|
| TEMPERATURA AMBIENTE      | 28    | °C                 |
| TEMPERATURA INTERNA       | 1,000 | °C                 |
| COEFICIENTE DE CONVECCIÓN | 15    | W/m <sup>2</sup> K |

Los resultados que se obtienen al ejecutar el análisis pueden observarse en las siguientes imágenes:

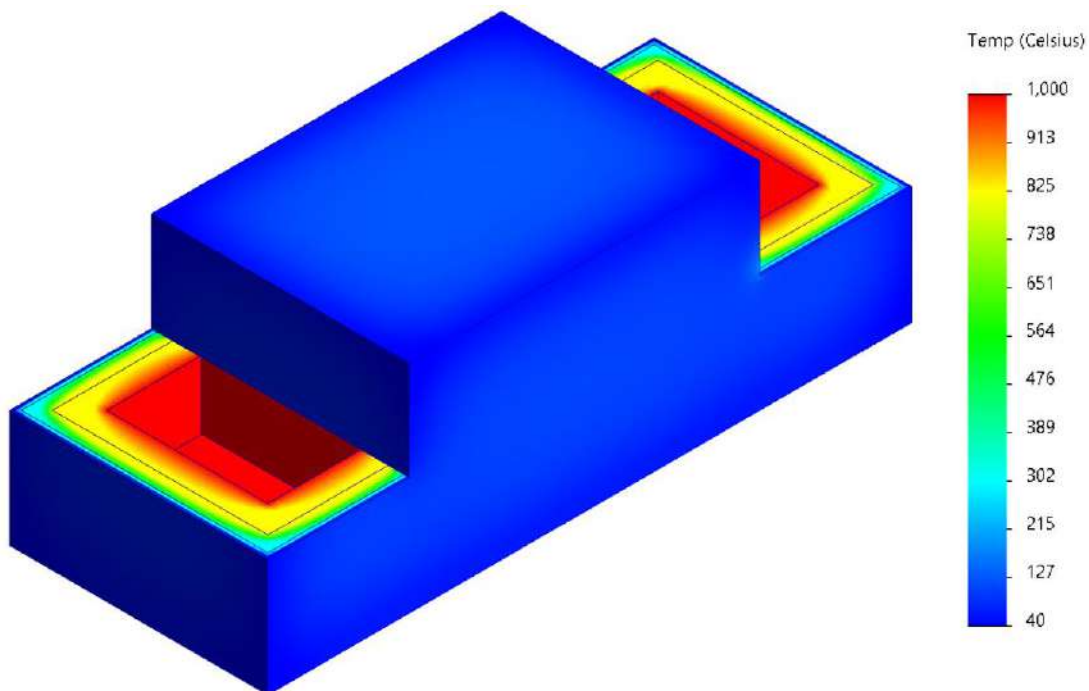


Imagen 75 Resultado de análisis, vista isométrica. Elaboración propia

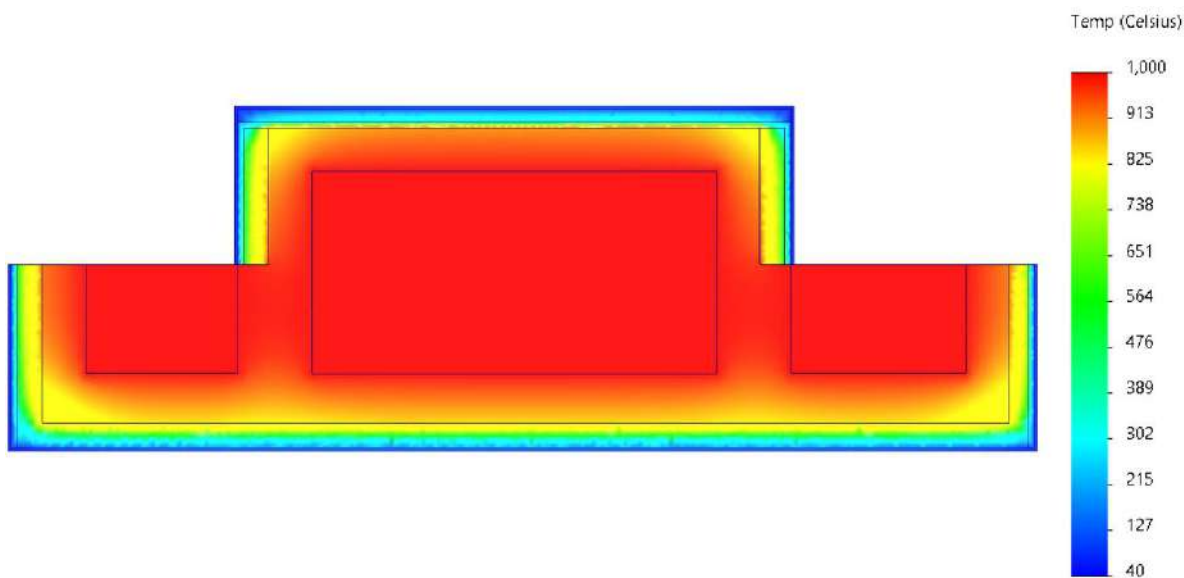


Imagen 76 Resultado de análisis, corte lateral. Elaboración propia

Para conocer la variación de la temperatura en la cara fría, se realizan diversas mediciones. Los resultados de estas se muestran a continuación:

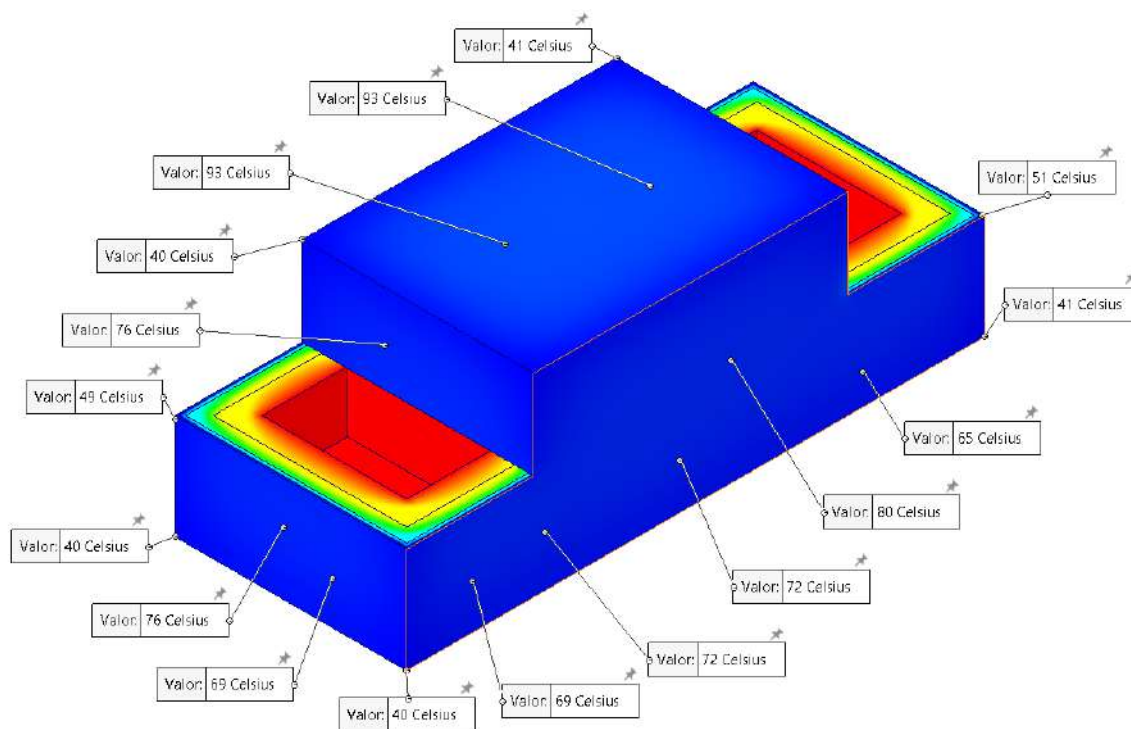


Imagen 77 Mediciones en cara fría, vista isométrica. Elaboración propia

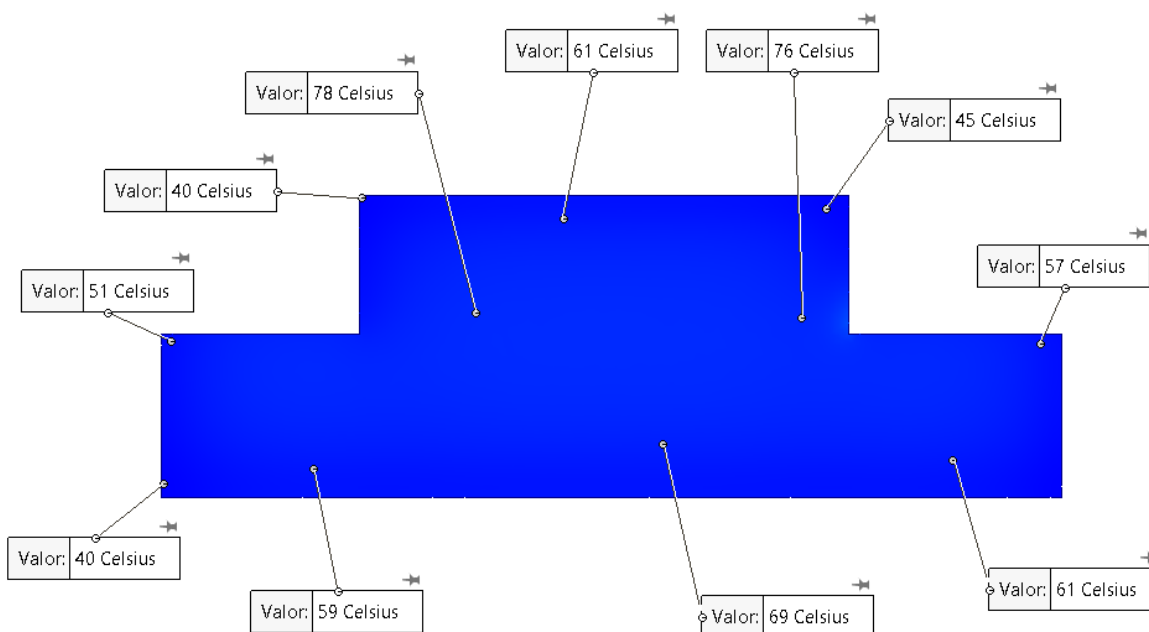


Imagen 78 Mediciones en cara fría, vista lateral. Elaboración propia

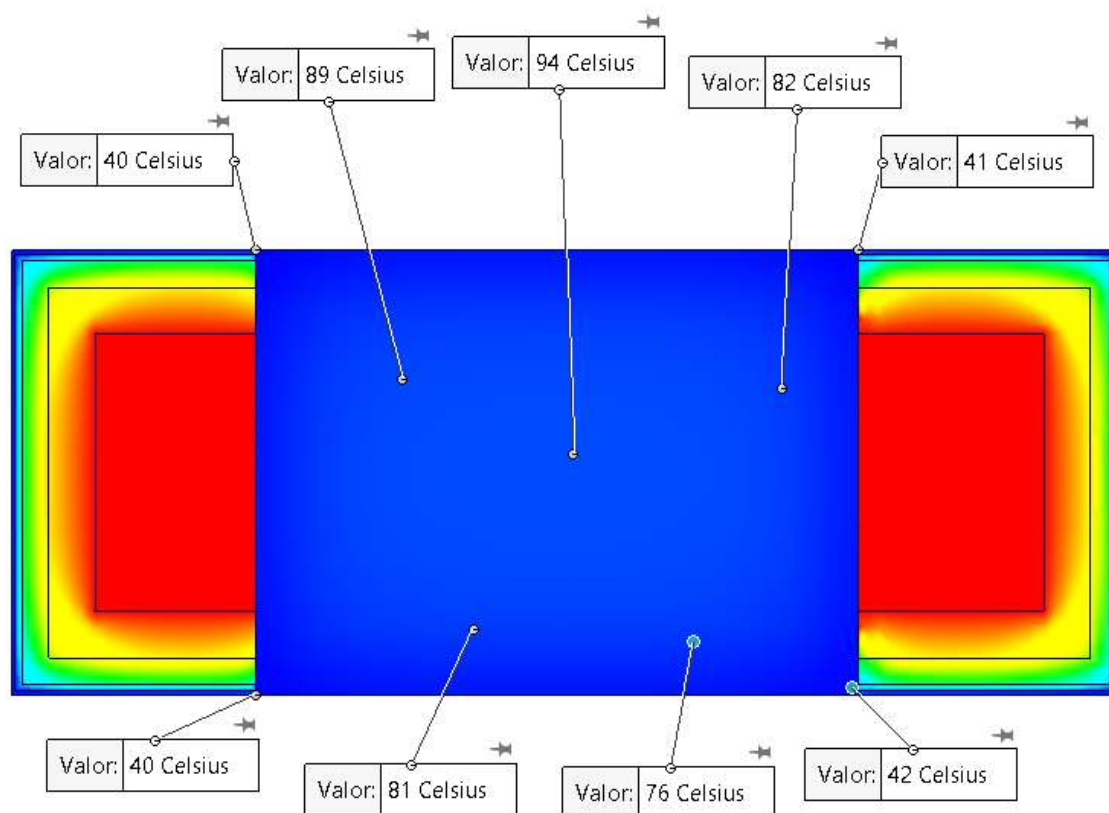


Imagen 79 Mediciones en cara fría, vista superior. Elaboración propia

Los resultados obtenidos se comparan más adelante. Para más información sobre esta propuesta, consulte los planos en la sección “Anexos”.

#### 4.2.9 Representación de esquemas 3 (reducción de espesor)

En esta propuesta de rediseño se toman en consideración los materiales propuestos y además se reduce el espesor del refractario en 1 pulgada. A diferencia de la propuesta anterior, en esta es necesario realizar nuevamente la volumetría para poder obtener la cantidad de material.

Debido a que solo se modifica el concreto refractario, se reutilizan los datos de los demás materiales para minimizar esfuerzos. Solo es necesario realizar un nuevo cálculo de volumen para las piezas a las que se les haya reducido el espesor.

## 4.2.10 Desarrollo de detalles 2

En la siguiente tabla se muestran los nuevos valores:

Tabla 39 Resultados de volumetría

| ## | MATERIAL               | ÁREA (m <sup>2</sup> ) | VOLUMEN (m <sup>3</sup> ) |
|----|------------------------|------------------------|---------------------------|
| 1  | REFRACTARIO 1          | 3.77                   | 0.19                      |
| 2  | AISLANTE 1             | 3.77                   | 0.1                       |
| 3  | REFRACTARIO 2          | 2.84                   | 0.419                     |
|    |                        |                        |                           |
| 4  | AISLANTE 1             | 1.23                   | 0.03                      |
| 5  | AISLANTE 2             | 1.23                   | 0.13                      |
| 6  | REFRACTARIO 2          | 0.76                   | 0.103                     |
|    |                        |                        |                           |
| 7  | AISLANTE 1             | 0.93                   | 0.02                      |
| 8  | AISLANTE 2             | 0.78                   | 0.08                      |
| 9  | REFRACTARIO 2          | 0.4                    | 0.107                     |
|    |                        |                        |                           |
| 10 | AISLANTE 1             | 3.11                   | 0.08                      |
| 11 | AISLANTE 2             | 2.98                   | 0.3                       |
| 12 | REFRACTARIO 2          | 2.36                   | 0.383                     |
| 13 | REFRACTARIO 2 CENT.1-2 | 0.47                   | 0.103                     |
|    |                        |                        |                           |
| 14 | AISLANTE 1             | 1.25                   | 0.03                      |
| 15 | AISLANTE 2             | 1.21                   | 0.12                      |
| 16 | REFRACTARIO 2          | 0.91                   | 0.123                     |
| 17 | REFRACTARIO 2 TRI.     | 0.47                   | 0.03                      |
|    |                        |                        |                           |
| 18 | AISLANTE 1             | 1.25                   | 0.03                      |
| 19 | AISLANTE 2             | 1.21                   | 0.09                      |
| 20 | REFRACTARIO 2          | 0.91                   | 0.103                     |
|    |                        |                        |                           |
| 21 | AISLANTE 2             | 5.58                   | 0.57                      |
| 22 | REFRACTARIO 2          | 3.82                   | 0.743                     |

Ya que se trata de los mismos materiales que en la propuesta anterior, no es necesario buscar nuevas fichas técnicas. Se pueden utilizar los mismos datos técnicos y pasar directamente al cálculo de material. En la siguiente tabla se muestran las nuevas cantidades obtenidas:

Tabla 40 Cantidades de material

| MATERIAL                    |                             | CANTIDAD | UNIDAD |
|-----------------------------|-----------------------------|----------|--------|
| CLIENTE                     | PROPUESTO                   |          |        |
| AISLANTE 1                  | AISLANTE 1                  | 36       | PZA    |
| AISLANTE 2                  | AISLANTE 2                  | 72       | PZA    |
| REFRACTARIO 1 (15% ALÚMINA) | REFRACTARIO 1 (15% ALÚMINA) | 61       | KG     |
| REFRACTARIO 2 (65% ALÚMINA) | REFRACTARIO 2 (60% ALÚMINA) | 1052     | KG     |
| REFRACTARIO 3 (88% ALÚMINA) | REFRACTARIO 2 (60% ALÚMINA) | 4141     | KG     |
| REFRACTARIO 4 (54% ALÚMINA) | REFRACTARIO 2 (60% ALÚMINA) | 1865     | KG     |

#### 4.2.11 Análisis térmico

Se utilizan condiciones ideales para el análisis de este horno, las cuales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 41 Variables de análisis térmico

| CONDICIÓN                 | VALOR | UNIDAD             |
|---------------------------|-------|--------------------|
| TEMPERATURA AMBIENTE      | 28    | °C                 |
| TEMPERATURA INTERNA       | 1,000 | °C                 |
| COEFICIENTE DE CONVECCIÓN | 15    | W/m <sup>2</sup> K |

Los resultados que se obtienen al ejecutar el análisis pueden observarse en las siguientes imágenes:

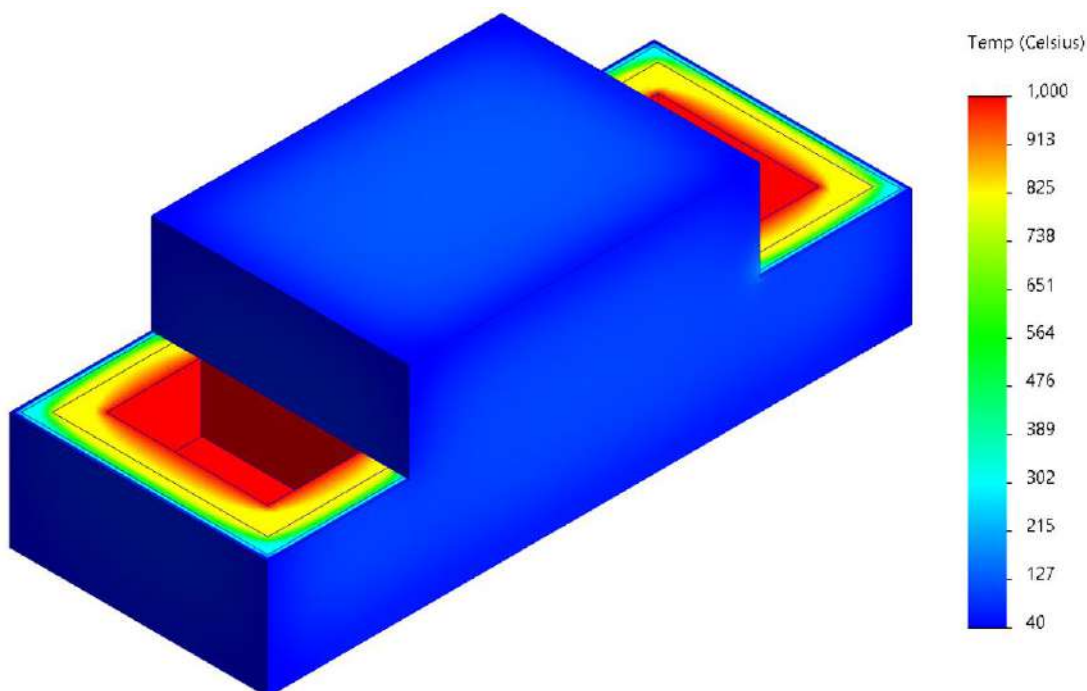


Imagen 80 Resultado de análisis, vista isométrica. Elaboración propia

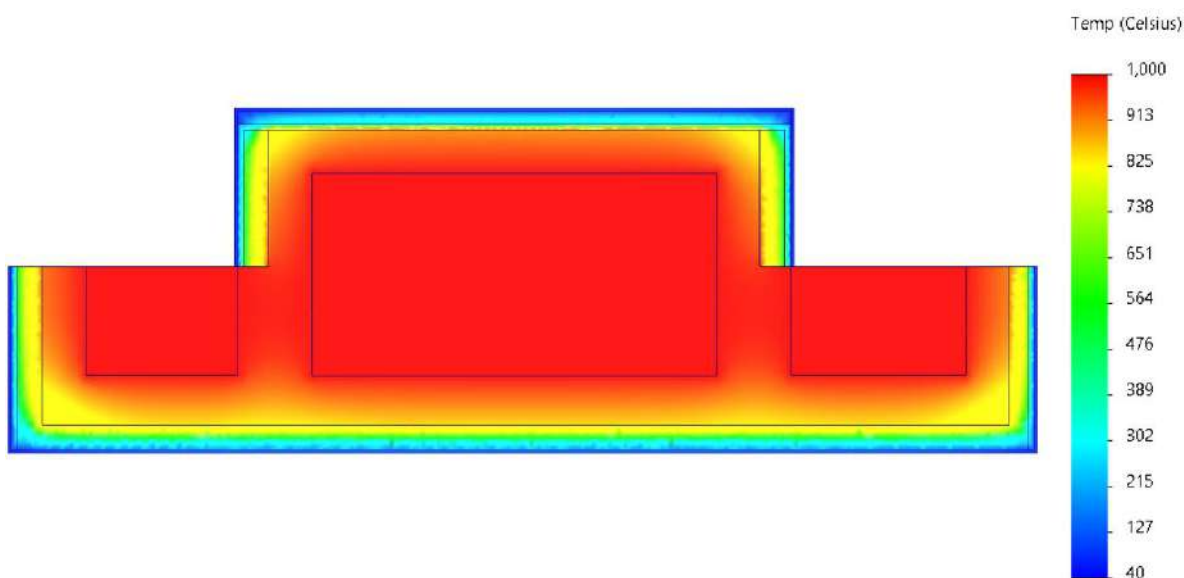


Imagen 81 Resultado de análisis, corte lateral. Elaboración propia

Para conocer la variación de la temperatura en la cara fría es necesario realizar diversas mediciones. Los resultados de estas se muestran a continuación:

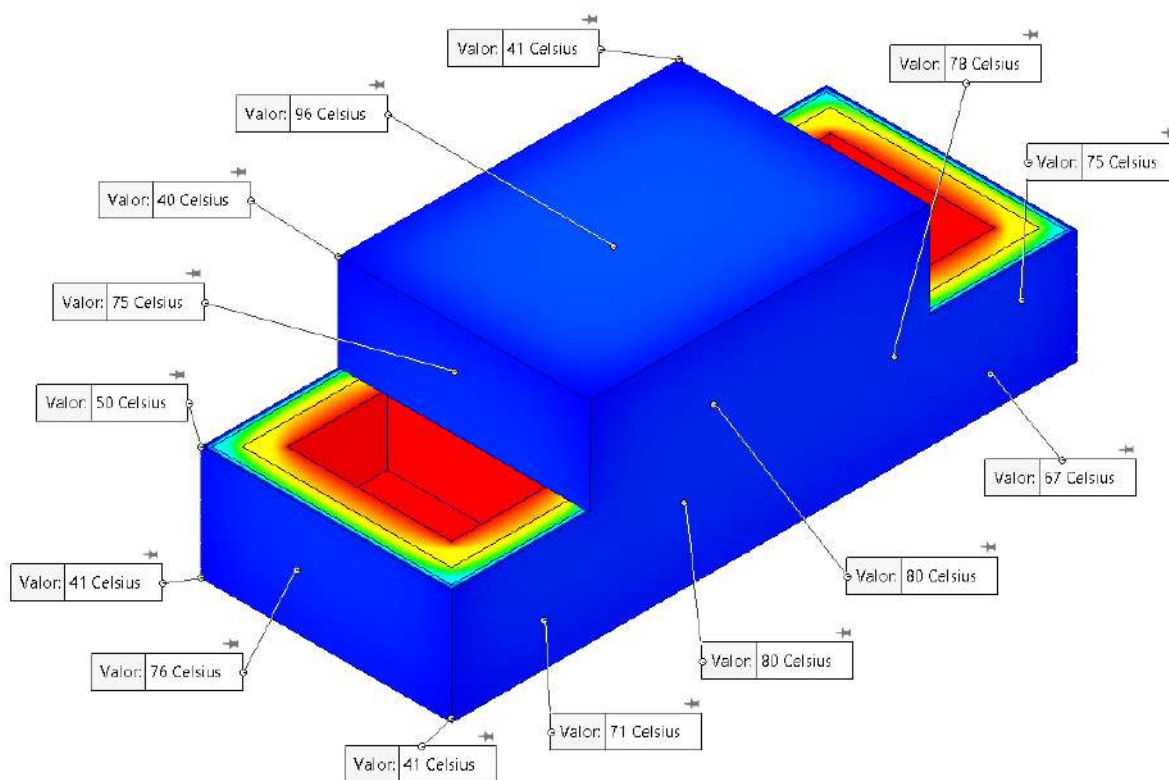


Imagen 82 Mediciones en cara fría, vista isométrica. Elaboración propia

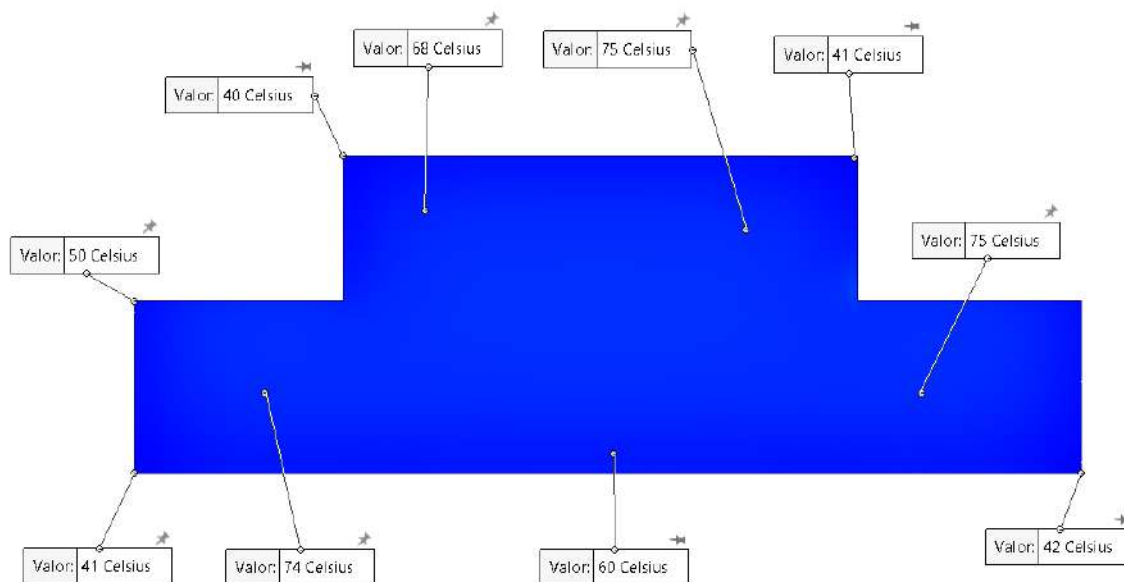


Imagen 83 Mediciones en cara fría, vista lateral. Elaboración propia

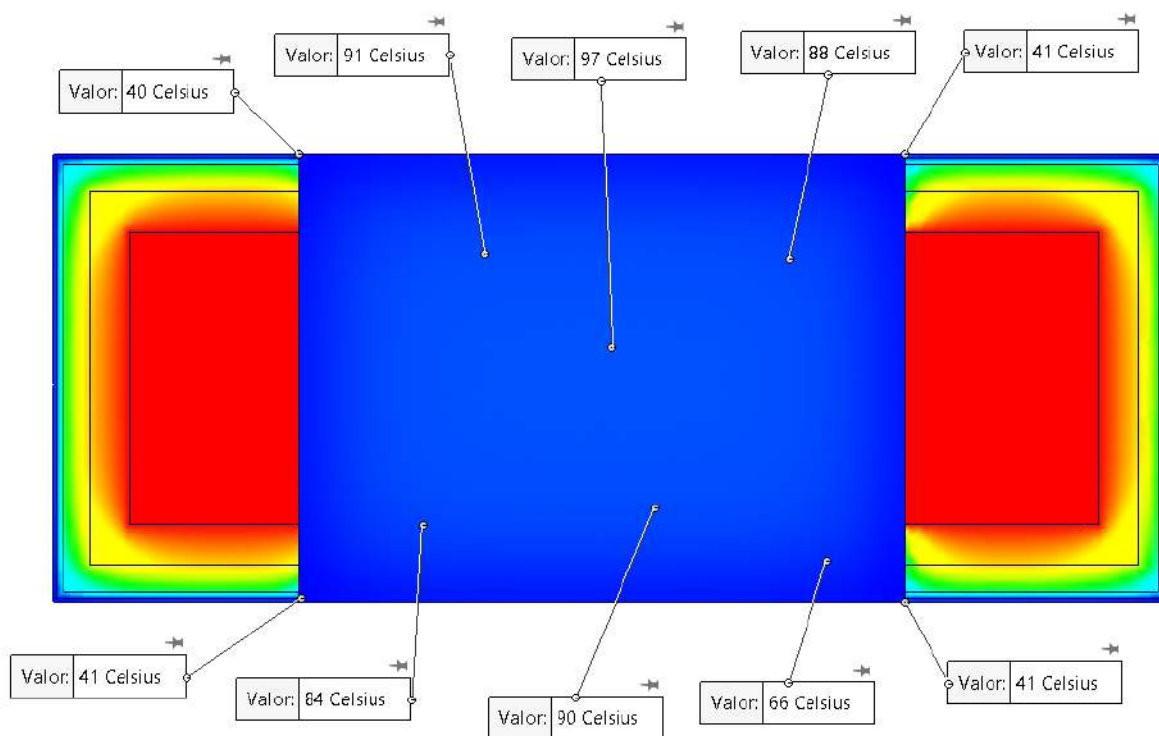


Imagen 84 Mediciones en cara fría, vista superior. Elaboración propia

#### 4.2.12 Interpretación de los resultados

Al utilizar los materiales propuestos y mantener el espesor original, se ahorran 1,900 kg de concreto refractario y se utilizan 3 placas más de aislante 1 en comparación con la propuesta que utiliza los materiales sugeridos por el cliente.

La variación de temperatura entre la propuesta con materiales originales y la propuesta con materiales propuestos es de aproximadamente 2 a 12°C, dependiendo de la zona donde se mida. La propuesta a la que se le han cambiado los materiales presenta zonas más frías.

Al reducir el espesor del refractario y utilizar los materiales propuestos, la cantidad de material se reduce en 852 kg, aunque la temperatura de la cara fría aumenta aproximadamente 1.5°C.



### 4.2.13 Conclusión

Los resultados obtenidos de las diferentes propuestas demuestran que cambiar los materiales utilizados es una opción viable de rediseño. En primer lugar, se logra un ahorro en la cantidad de material necesario para la construcción. Los materiales propuestos ofrecen una mejor eficiencia térmica del horno. Se observa una reducción en la temperatura en la cara fría, lo que implica una mejor retención de calor al interior del horno, resultando en un entorno de trabajo más cómodo.

Por otro lado, la reducción del espesor del concreto refractario proporciona varias ventajas, como un aumento en la capacidad volumétrica del horno y un ahorro aún mayor en material. Sin embargo, esta opción conlleva un aumento considerable en la temperatura de la cara fría. Por lo tanto, esta propuesta deberá ser evaluada más a detalle por el departamento correspondiente de la empresa cliente.

Se recomienda seleccionar la propuesta con los nuevos materiales, ya que presenta un mejor equilibrio entre eficiencia térmica, ahorro de costos y confort en el entorno de trabajo, en comparación con las demás opciones.

## 4.3 Horno de fundición tipo túnel reverbero con bahía de recirculación 3

### 4.3.1 Análisis del problema

Este horno pertenece a la empresa EMERSON ubicada en Russellville, Kentucky, Estados Unidos. Se debe aplicar la metodología desarrollada para obtener los datos necesarios que sustenten las propuestas que serán presentadas al cliente.

Del plano proporcionado por la empresa se obtiene la siguiente información:

1.- Se han obtenido las medidas de las siguientes secciones externas.

*Tabla 42 Medidas*

| MEDIDAS                    |
|----------------------------|
| ALTURA                     |
| LONGITUD                   |
| ANCHO                      |
| ALTURA DEL TANQUE          |
| LONGITUD DEL DIP           |
| LONGITUD DEL POZO DE CARGA |

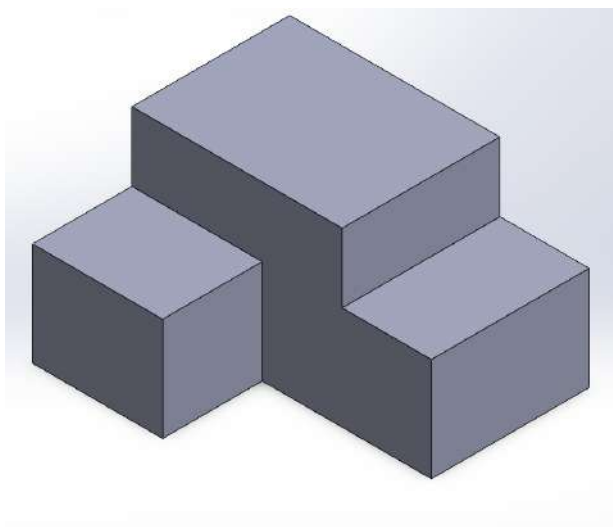
2.- Revestimiento interno

*Tabla 43 Materiales originales*

| MATERIALES                  |
|-----------------------------|
| AISLANTE 1                  |
| AISLANTE 2                  |
| AISLANTE 3                  |
| REFRACTARIO 1 (15% ALÚMINA) |
| REFRACTARIO 2 (65% ALÚMINA) |
| REFRACTARIO 3 (88% ALÚMINA) |
| REFRACTARIO 4 (50% ALÚMINA) |

### 4.3.2 Desarrollo conceptual

Con la información recopilada, se crea un bosquejo de la forma final del horno. Este se muestra en la siguiente imagen:



*Imagen 85 Diseño inicial*

### 4.3.3 Representación de esquemas 1

Se asignan colores a cada uno de los materiales que conforman el revestimiento térmico, los cuales deben ser aplicados en sus respectivas piezas diseñadas. Esto se hace para mejorar la estética del horno y facilitar la identificación de las piezas. Los colores utilizados en este diseño se muestran en la siguiente tabla:

*Tabla 44 Colores de materiales*

| MATERIAL                    | ###                                                                                  |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| AISLANTE 1                  |  |
| AISLANTE 2                  |  |
| AISLANTE 3                  |  |
| REFRACTARIO 1 (15% ALÚMINA) |  |
| REFRACTARIO 2 (65% ALÚMINA) |  |
| REFRACTARIO 3 (88% ALÚMINA) |  |
| REFRACTARIO 4 (50% ALÚMINA) |  |

El diseño de las piezas necesarias para formar el revestimiento térmico debe realizarse según lo indicado en el punto 3.1.4.3.

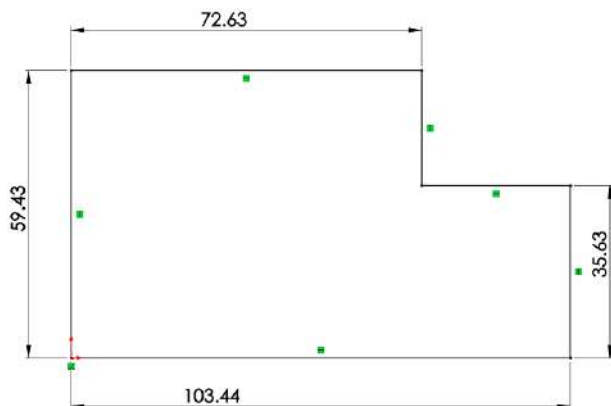


Imagen 86 Ejemplo de croquis. Elaboración propia

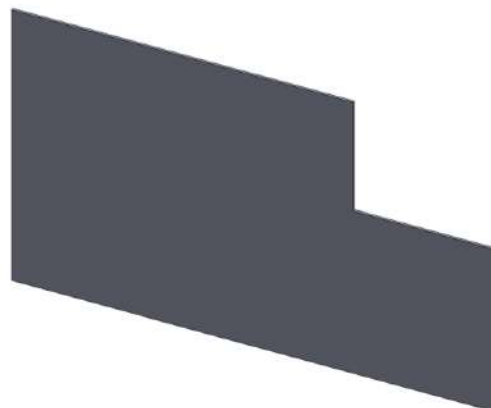


Imagen 87 Pieza final. Elaboración propia

Algunas piezas diseñadas se muestran a continuación.

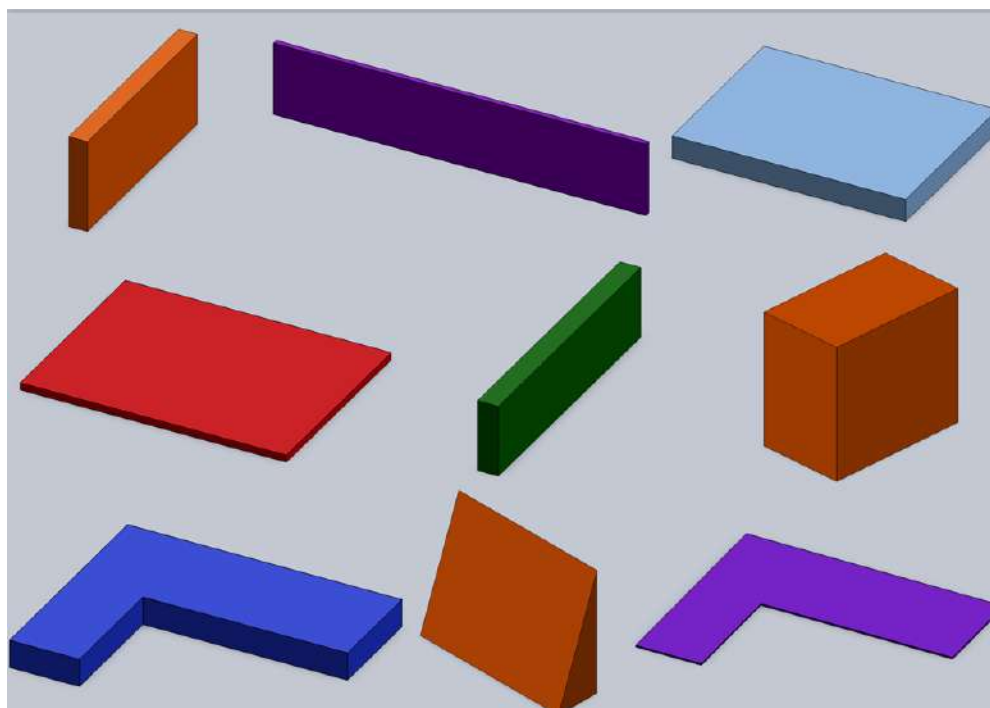
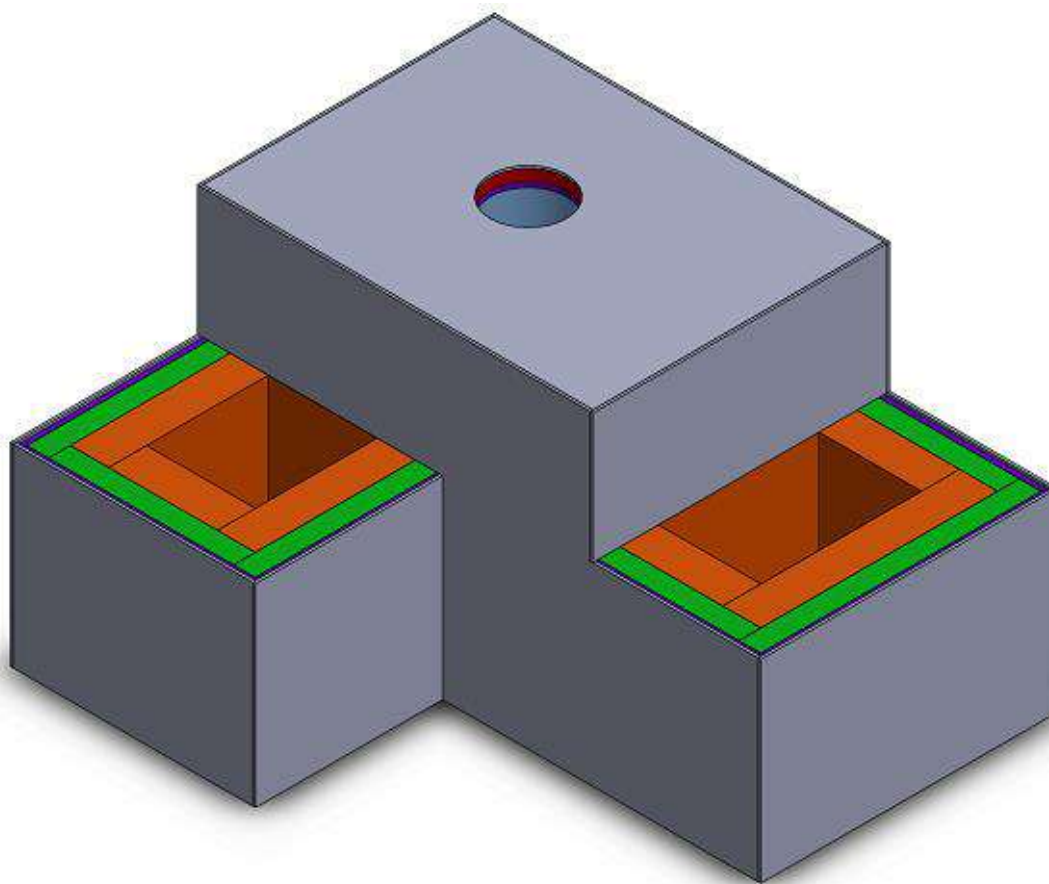
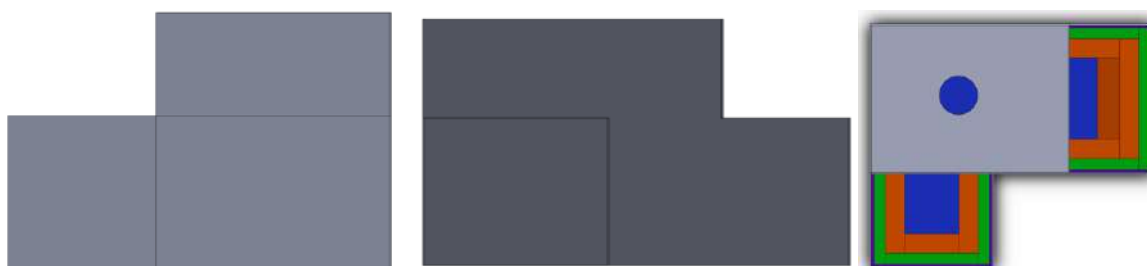


Imagen 88 Piezas diseñadas

Con estas piezas se realiza el ensamble mediante el método mostrado en el punto 3.5.3.2. El ensamble producto de estas operaciones es el siguiente:

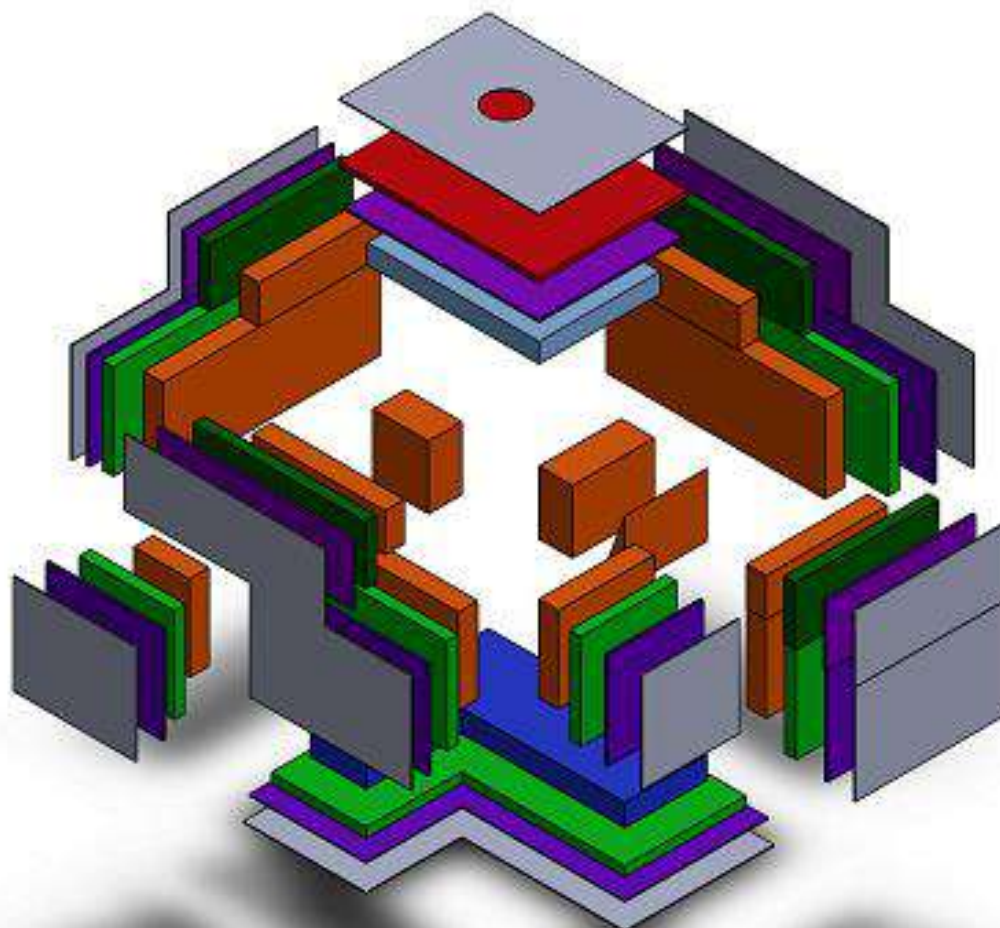


*Imagen 89 Ensamble final. Elaboración propia*



*Imagen 90 Vistas lateral, frontal y superior del ensamble. Elaboración propia*

Para finalizar el diseño, se crea la vista explosionada utilizando el procedimiento mencionado en el punto 3.5.3.3. Dicha vista se muestra a continuación:



*Imagen 91 Vista explosionada. Elaboración propia*

#### **4.3.4 Desarrollo de detalles 1**

Se realiza el cálculo de volumetría conforme a lo establecido en el punto 3.5.4.1, asegurándose de organizar los resultados obtenidos en una tabla de Excel para facilitar el desarrollo de las siguientes fases. Dicha tabla se muestra a continuación:

Tabla 45 Resultados de volumetría

| ## | MATERIAL              | ÁREA<br>(m <sup>2</sup> ) | VOLUMEN<br>(m <sup>3</sup> ) |
|----|-----------------------|---------------------------|------------------------------|
| 1  | REFRACTARIO 1         | 2.47                      | 0.13                         |
| 2  | AISLANTE 1            | 2.31                      | 0.06                         |
| 3  | REFRACTARIO 4         | 1.73                      | 0.31                         |
|    |                       |                           |                              |
| 4  | AISLANTE 1            | 0.98                      | 0.02                         |
| 5  | AISLANTE 3            | 0.83                      | 0.09                         |
| 6  | REFRACTARIO 3         | 0.43                      | 0.08                         |
|    |                       |                           |                              |
| 7  | AISLANTE 1            | 0.75                      | 0.02                         |
| 8  | AISLANTE 3            | 0.69                      | 0.07                         |
| 9  | REFRACTARIO 3         | 0.39                      | 0.07                         |
|    |                       |                           |                              |
| 10 | AISLANTE 1            | 2.25                      | 0.06                         |
| 11 | AISLANTE 2            | 2.04                      | 0.21                         |
| 12 | REFRACTARIO 3         | 1.55                      | 0.28                         |
| 13 | REFRACTARIO 3 TR.     | 0.43                      | 0.045                        |
|    |                       |                           |                              |
| 14 | AISLANTE 1            | 1.31                      | 0.04                         |
| 15 | AISLANTE 2            | 1.29                      | 0.13                         |
| 16 | REFRACTARIO 3         | 1.15                      | 0.21                         |
| 17 | REFRACTARIO 3 CENT.1  | 0.43                      | 0.13                         |
|    |                       |                           |                              |
| 18 | AISLANTE 1            | 0.94                      | 0.024                        |
| 19 | AISLANTE 2            | 0.75                      | 0.08                         |
| 20 | REFRACTARIO 3         | 0.4                       | 0.071                        |
| 21 | REFRACTARIO 3 CENT. 2 | 0.29                      | 0.09                         |

Se buscan en las fichas técnicas de los materiales datos como su presentación, dimensiones, densidad, conductividad térmica, etc. Dichos datos se muestran en la siguiente tabla:



Tabla 46 Datos técnicos de los materiales

| MATERIAL      | LARGO<br>(m) | ANCHO<br>(m) | ÁREA<br>(m2) | DENSIDAD<br>(kg/m3) |
|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------------|
| AISLANTE 1    | 1            | 0.6          | 0.6          | 300                 |
| AISLANTE 2    | 1            | 1.25         | 1.25         | 255                 |
| AISLANTE 3    | 1.2          | 0.6          | 0.72         | 224.25              |
| REFRACTARIO 1 | -            | -            | -            | 320                 |
| REFRACTARIO 2 | -            | -            | -            | 2590                |
| REFRACTARIO 3 | -            | -            | -            | 2840                |
| REFRACTARIO 4 | -            | -            | -            | 2210                |

Mediante el procedimiento definido en el punto 3.5.4.2 se realiza el cálculo de la cantidad de material, el cual arroja los siguientes resultados:

Tabla 47 Cantidades de material

| MATERIAL      | CANTDAD |      |
|---------------|---------|------|
|               | KG      | PZAS |
| AISLANTE 1    | -       | 35   |
| AISLANTE 2    | -       | 12   |
| AISLANTE 3    | -       | 5    |
| REFRACTARIO 1 | 42      | -    |
| REFRACTARIO 2 | 1036    | -    |
| REFRACTARIO 3 | 4794    | -    |
| REFRACTARIO 4 | 686     | -    |

### 4.3.5 Análisis térmico

Se utilizan condiciones ideales para el análisis de este horno, las cuales se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 48 Variables de análisis térmico

| CONDICIÓN                 | VALOR | UNIDAD             |
|---------------------------|-------|--------------------|
| TEMPERATURA AMBIENTE      | 28    | °C                 |
| TEMPERATURA INTERNA       | 1,000 | °C                 |
| COEFICIENTE DE CONVECCIÓN | 15    | W/m <sup>2</sup> K |

Los resultados obtenidos al ejecutar el análisis pueden observarse en las siguientes imágenes:

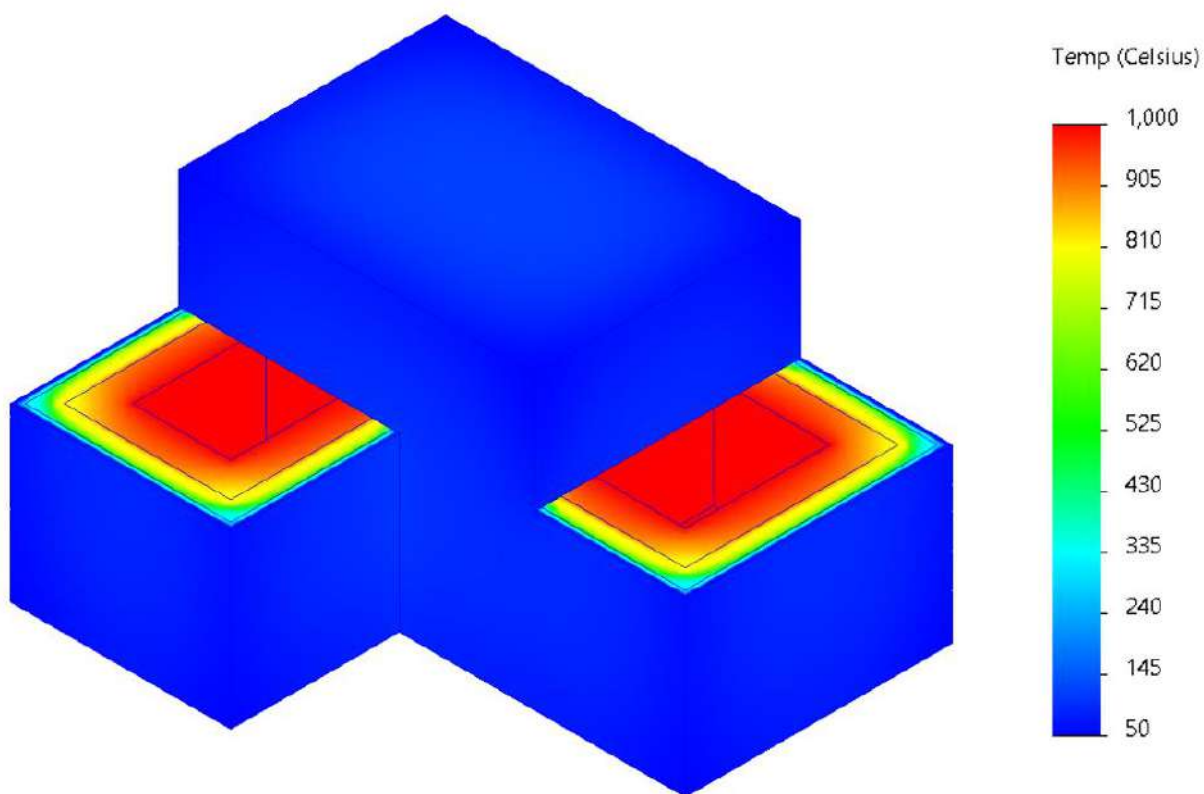


Imagen 92 Resultado de análisis, vista isométrica. Elaboración propia

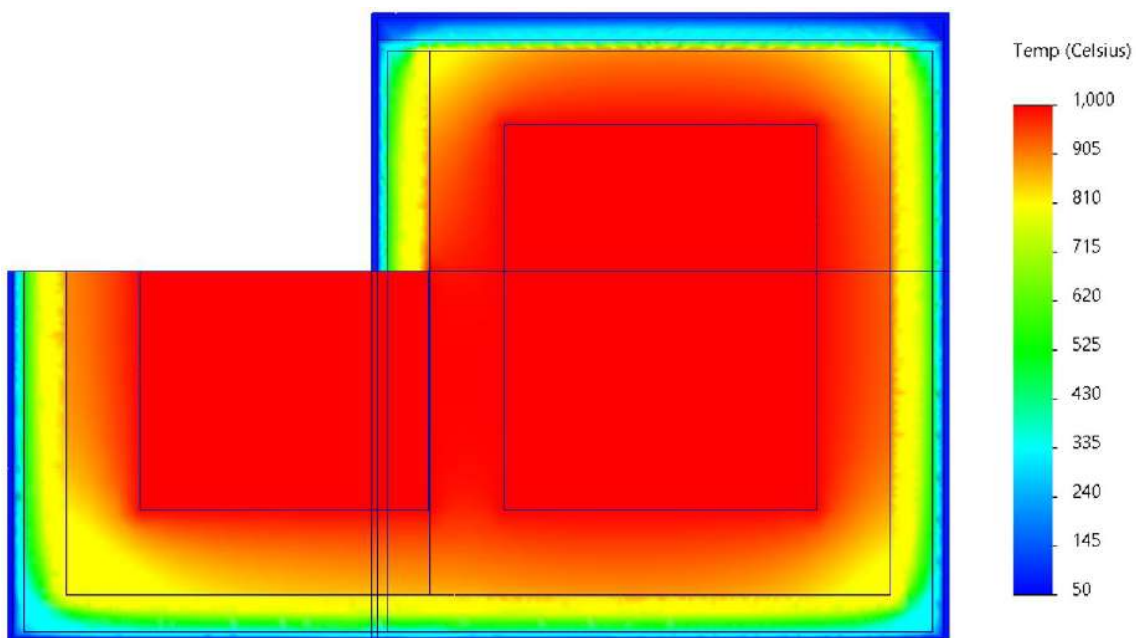


Imagen 93 Resultado de análisis, corte lateral. Elaboración propia

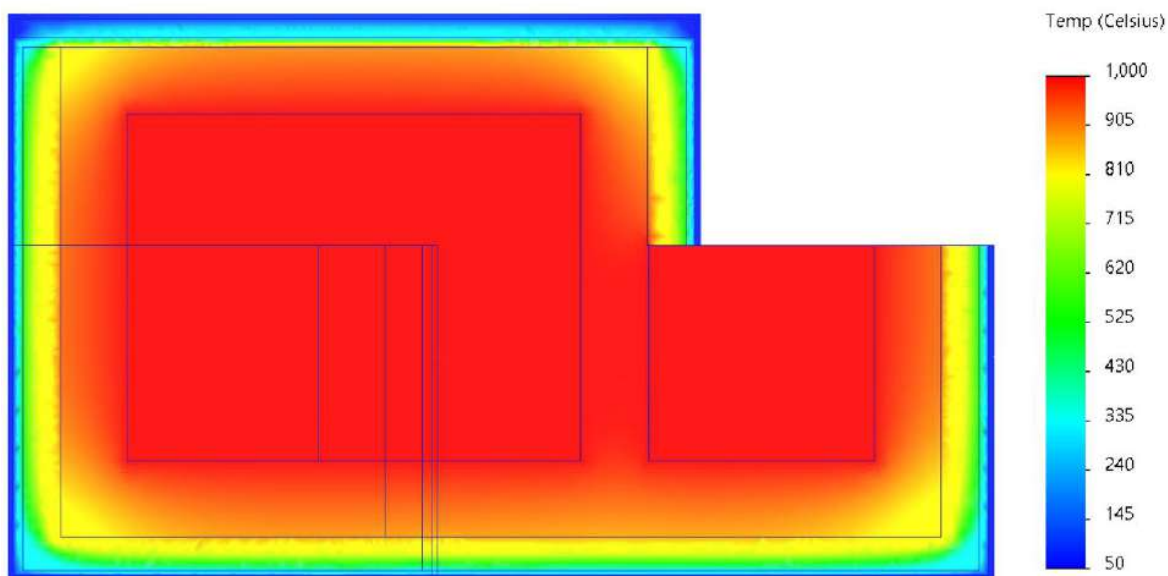


Imagen 94 Resultado de análisis, corte frontal. Elaboración propia

Se realizan diversas mediciones en todo el modelo para conocer la temperatura en la cara fría:

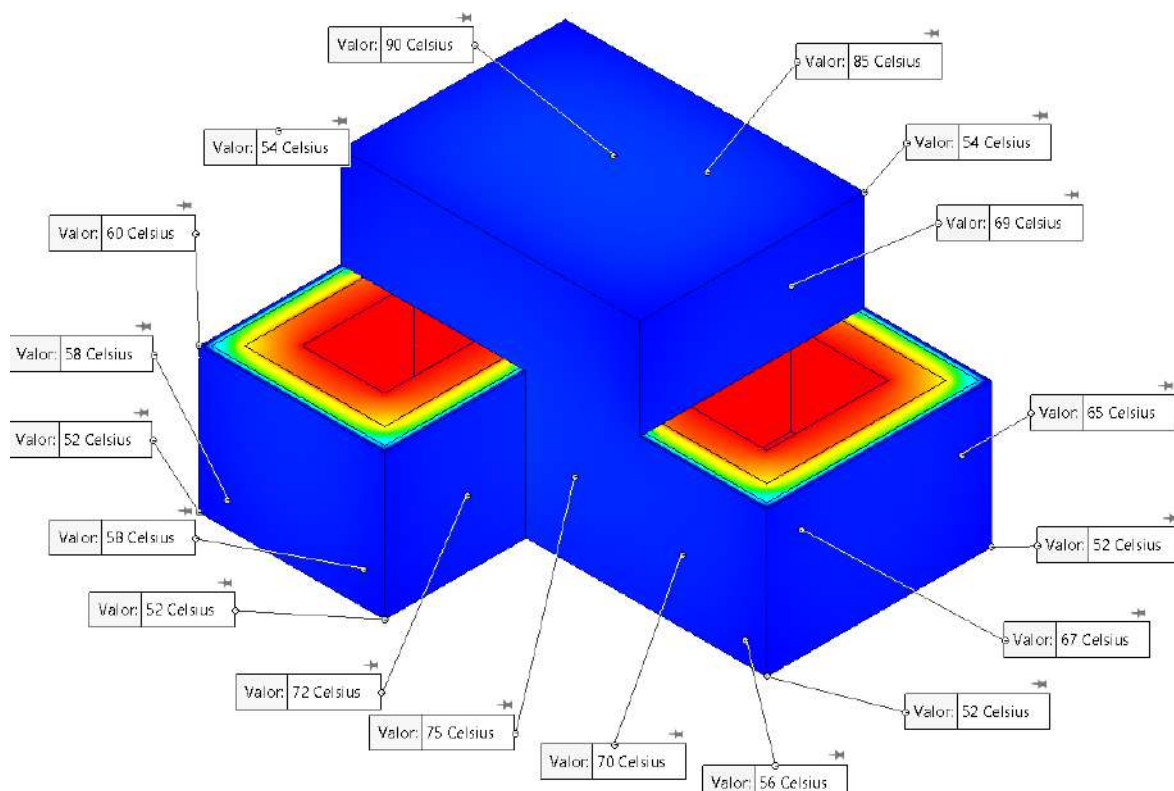


Imagen 95 Mediciones en cara fría, vista isométrica. Elaboración propia

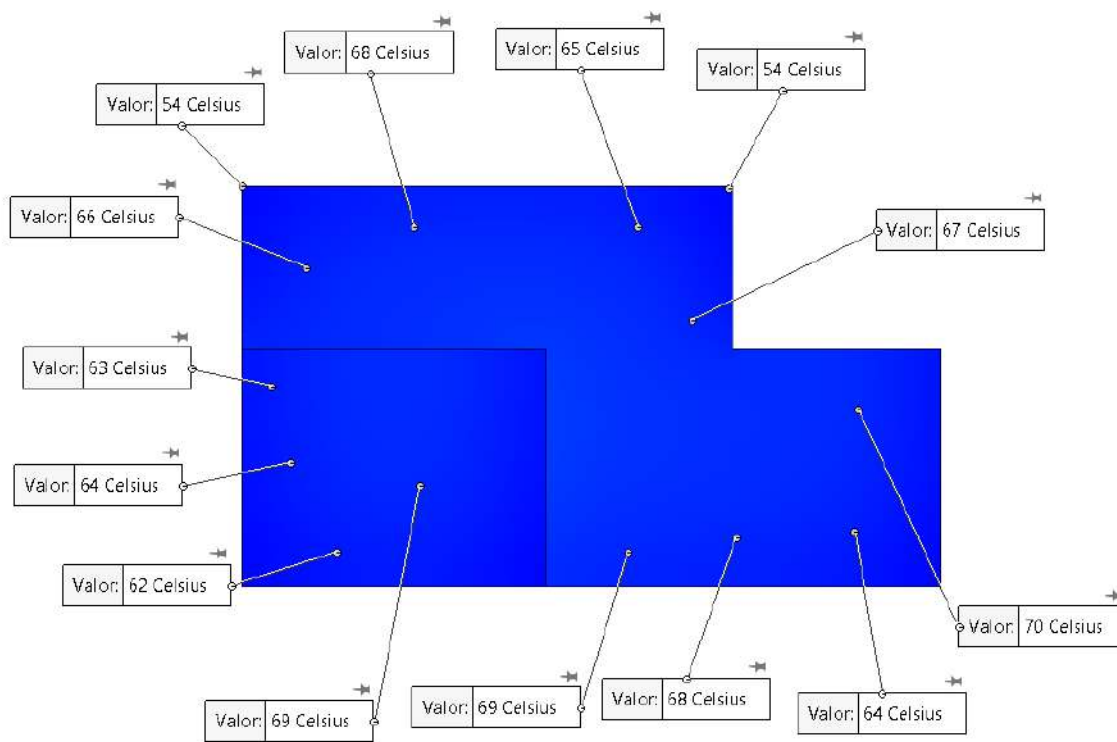


Imagen 96 Mediciones en cara fría, vista lateral. Elaboración propia

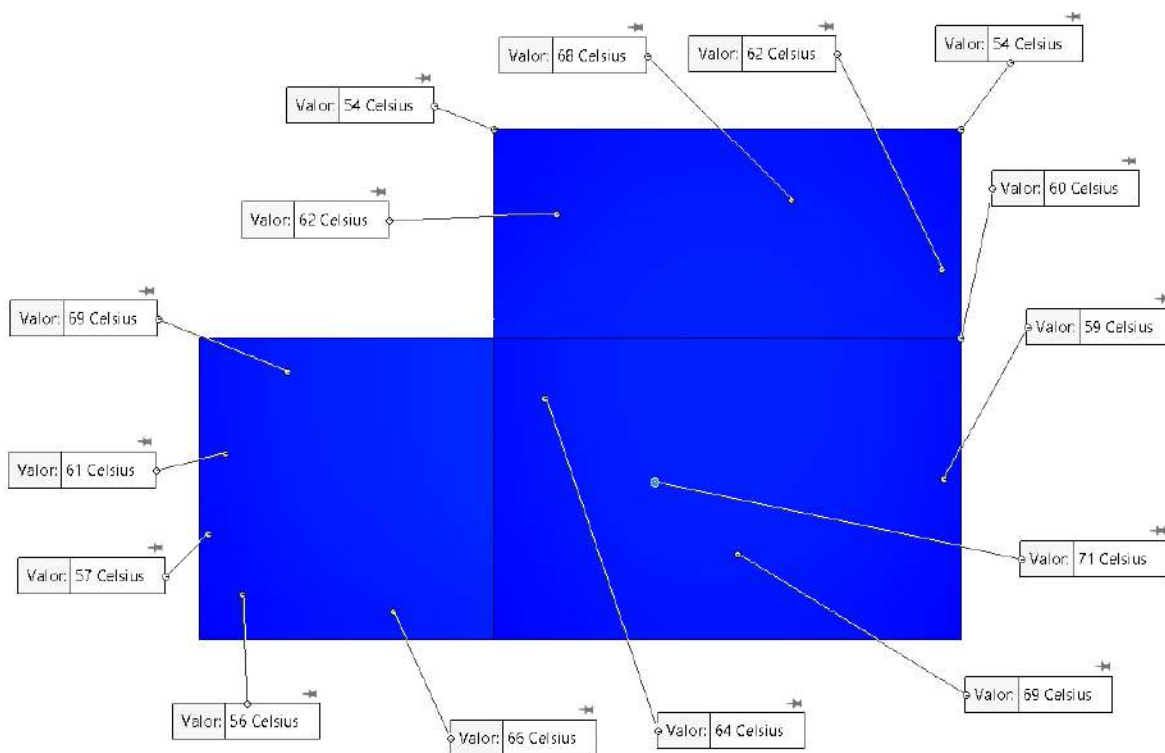


Imagen 97 Mediciones en cara fría, vista frontal Elaboración propia

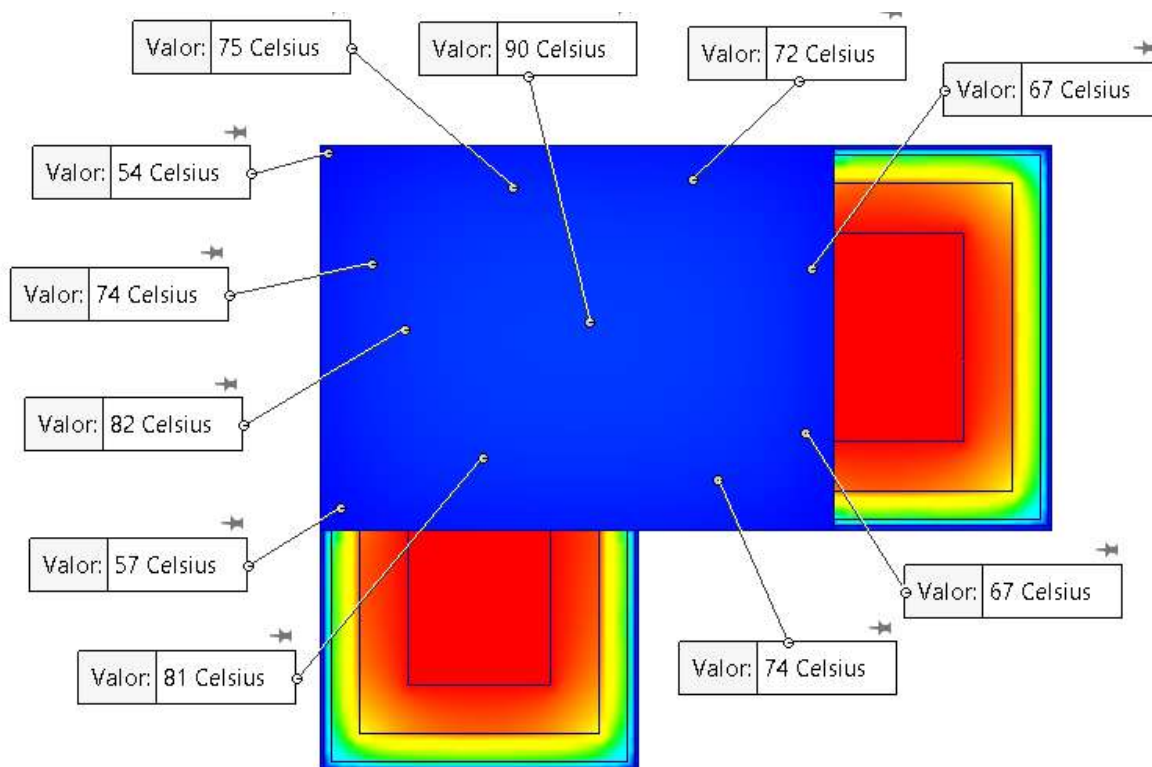


Imagen 98 Mediciones en cara fría, vista superior. Elaboración propia

#### 4.3.6 Representación de esquemas 2 (cambio de materiales)

Para el desarrollo de esta propuesta se utiliza el mismo diseño 3D y, por lo tanto, se utilizan los mismos datos de volumetría. Antes de proceder con el cálculo de material, deben tenerse en cuenta algunas consideraciones:

1.- Los nuevos materiales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 49 Nuevos materiales

| MATERIAL                    |                             |
|-----------------------------|-----------------------------|
| CLIENTE                     | PROPUESTO                   |
| AISLANTE 1                  | AISLANTE 1                  |
| AISLANTE 2                  | AISLANTE 2                  |
| AISLANTE 3                  | AISLANTE 2                  |
| REFRACTARIO 1 (15% ALÚMINA) | REFRACTARIO 1 (15% ALÚMINA) |
| REFRACTARIO 2 (65% ALÚMINA) | REFRACTARIO 2 (60%ALÚMINA)  |
| REFRACTARIO 3 (88% ALÚMINA) | REFRACTARIO 2 (60% ALÚMINA) |
| REFRACTARIO 4 (50% ALÚMINA) | REFRACTARIO 2 (60%ALÚMINA)  |

2.- Los colores utilizados en estos nuevos materiales son los siguientes:

Tabla 50 Colores de nuevos materiales

| MATERIAL                    | ### |
|-----------------------------|-----|
| AISLANTE 1                  |     |
| AISLANTE 2                  |     |
| REFRACTARIO 1 (15% ALÚMINA) |     |
| REFRACTARIO 2 (60%ALÚMINA)  |     |

3.- Los datos técnicos de estos materiales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 51 Datos técnicos de los nuevos materiales

| MATERIAL                    | LARGO<br>(m) | ANCHO<br>(m) | ÁREA<br>(m2) | DENSIDAD<br>(kg/m3) |
|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------------|
| AISLANTE 1                  | 1            | 0.5          | 0.5          | 320                 |
| AISLANTE 2                  | 0.6096       | 0.9144       | 0.55742      | 256                 |
| REFRACTARIO 1 (15% ALÚMINA) | -            | -            | -            | 320                 |
| REFRACTARIO 2 (60%ALÚMINA)  | -            | -            | -            | 2510                |

### 4.3.7 Desarrollo de detalles 2

Mediante la aplicación del procedimiento de cálculo de material mostrado en el punto 3.5.4.2, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 52 Cantidades de material

| MATERIAL                    |                             | CANTIDAD | UNIDAD |
|-----------------------------|-----------------------------|----------|--------|
| CLIENTE                     | PROPUESTO                   |          |        |
| AISLANTE 1                  | AISLANTE 1                  | 40       | PZA    |
| AISLANTE 2                  | AISLANTE 2                  | 57       | PZA    |
| AISLANTE 3                  | AISLANTE 2                  | 12       | PZA    |
| REFRACTARIO 1 (15% ALÚMINA) | REFRACTARIO 1 (15% ALÚMINA) | 42       | KG     |
| REFRACTARIO 2 (65% ALÚMINA) | REFRACTARIO 2 (60%ALÚMINA)  | 1004     | KG     |
| REFRACTARIO 3 (88% ALÚMINA) | REFRACTARIO 2 (60% ALÚMINA) | 4237     | KG     |
| REFRACTARIO 4 (50% ALÚMINA) | REFRACTARIO 2 (60%ALÚMINA)  | 779      | KG     |

### 4.3.8 Análisis térmico

Se emplean condiciones ideales para el análisis de este horno, las cuales se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 53 Variables de análisis térmico

| CONDICIÓN                 | VALOR | UNIDAD |
|---------------------------|-------|--------|
| TEMPERATURA AMBIENTE      | 28    | °C     |
| TEMPERATURA INTERNA       | 1,000 | °C     |
| COEFICIENTE DE CONVECCIÓN | 15    | W/m2 K |

Los resultados que se obtienen al ejecutar el análisis pueden observarse en las siguientes imágenes:

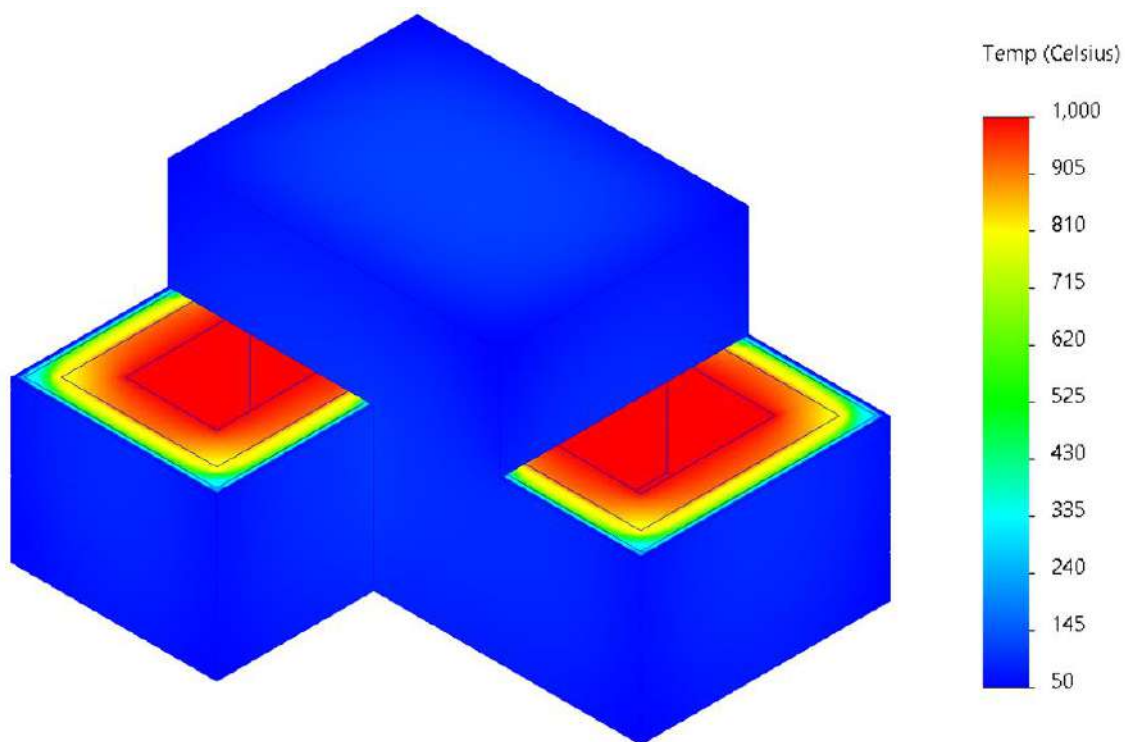


Imagen 99 Resultado de análisis, vista isométrica. Elaboración propia

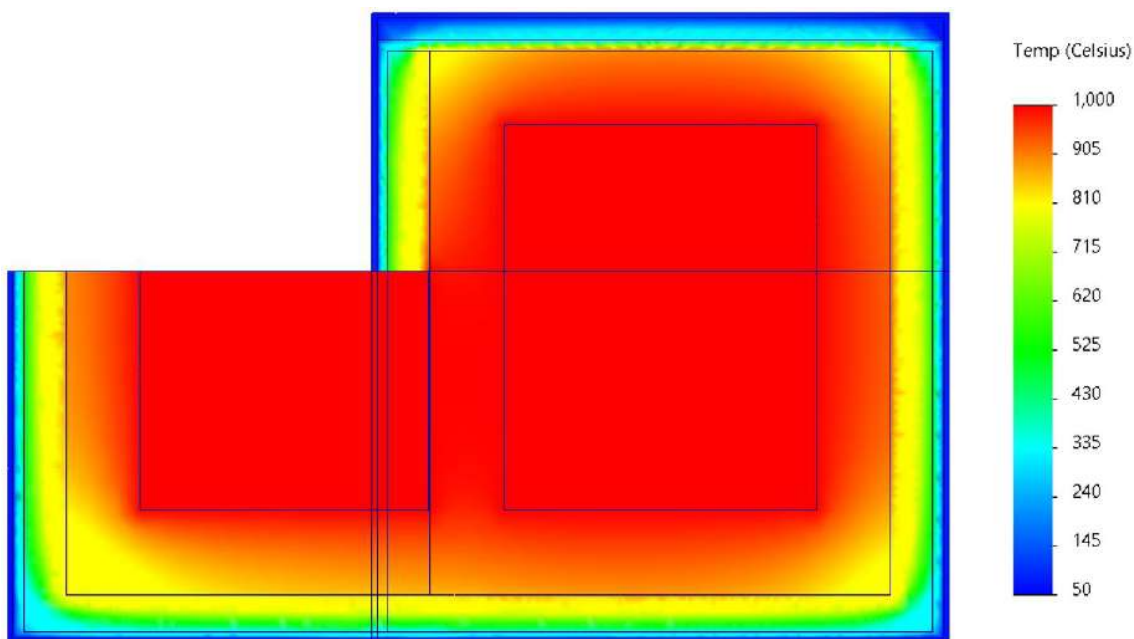
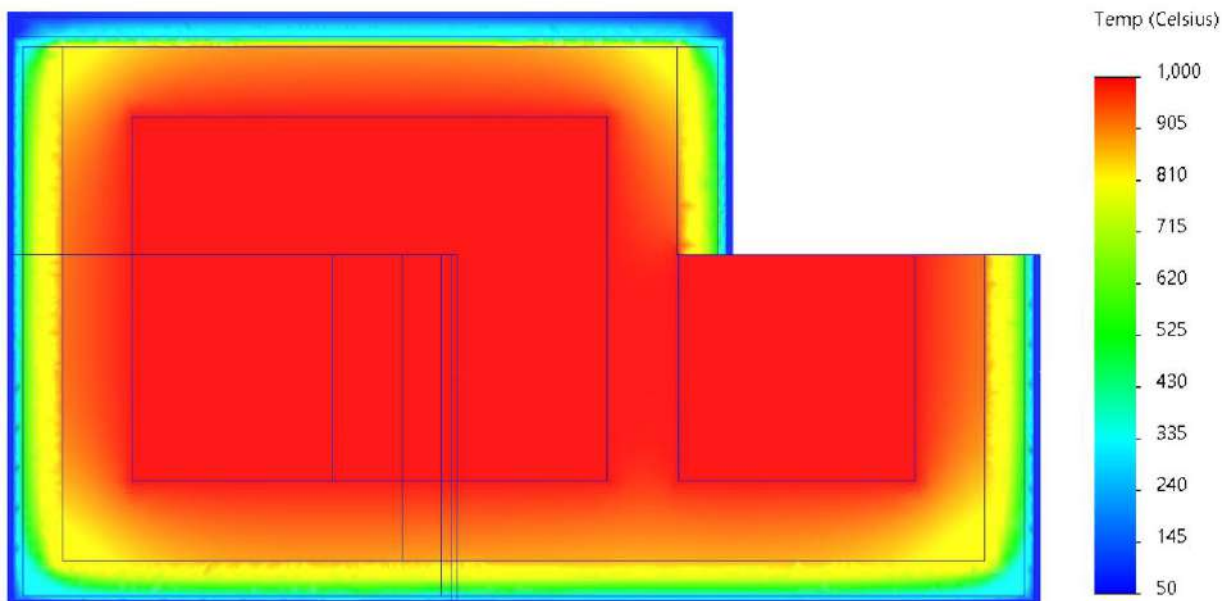


Imagen 100 Resultado de análisis, corte lateral. Elaboración propia



*Imagen 101 Resultado de análisis, frontal. Elaboración propia*

#### 4.3.9 Representación de esquemas 3 (reducción de espesor)

En esta propuesta de rediseño se consideran los materiales propuestos y se reduce el espesor del refractario interno en 1 pulgada. A diferencia de la propuesta anterior, en esta ocasión es necesario realizar nuevamente la volumetría para determinar la cantidad de material requerido. El modelo al cual se le aplican estos cambios, es el utilizado en la representación de esquemas 2.

#### 4.3.10 Desarrollo de detalles 3

Se realiza un nuevo cálculo de volumetría para el horno y se registran los resultados obtenidos en una tabla de Excel para su uso en las siguientes fases. Esa tabla se muestra a continuación:

Tabla 54 Nueva volumetría

| ### | MATERIAL              | ÁREA (m <sup>2</sup> ) | VOLUMEN (m <sup>3</sup> ) |
|-----|-----------------------|------------------------|---------------------------|
| 1   | REFRACTARIO 1         | 2.47                   | 0.13                      |
| 2   | AISLANTE 1            | 2.31                   | 0.06                      |
| 3   | REFRACTARIO 4         | 1.73                   | 0.279                     |
| 4   | AISLANTE 1            | 0.98                   | 0.04                      |
| 5   | AISLANTE 3            | 0.83                   | 0.18                      |
| 6   | REFRACTARIO 3         | 0.43                   | 0.129                     |
| 7   | AISLANTE 1            | 0.75                   | 0.04                      |
| 8   | AISLANTE 3            | 0.69                   | 0.14                      |
| 9   | REFRACTARIO 3         | 0.39                   | 0.109                     |
| 10  | AISLANTE 1            | 2.25                   | 0.06                      |
| 11  | AISLANTE 2            | 2.04                   | 0.21                      |
| 12  | REFRACTARIO 3         | 1.55                   | 0.249                     |
| 13  | REFRACTARIO 3 TR.     | 0.43                   | 0.014                     |
| 14  | AISLANTE 1            | 1.31                   | 0.04                      |
| 15  | AISLANTE 2            | 1.29                   | 0.13                      |
| 16  | REFRACTARIO 3         | 1.15                   | 0.179                     |
| 17  | REFRACTARIO 3 CENT.1  | 0.43                   | 0.099                     |
| 18  | AISLANTE 1            | 0.94                   | 0.024                     |
| 19  | AISLANTE 2            | 0.75                   | 0.08                      |
| 20  | REFRACTARIO 3         | 0.4                    | 0.04                      |
| 21  | REFRACTARIO 3 CENT. 2 | 0.29                   | 0.059                     |

Aplicando el procedimiento definido en el punto 3.5.4.2 se obtienen las siguientes cantidades de material:

Tabla 55 Cantidades de material

| MATERIAL                    |                             | CANTIDAD | UNIDAD |
|-----------------------------|-----------------------------|----------|--------|
| CLIENTE                     | PROPUESTO                   |          |        |
| AISLANTE 1                  | AISLANTE 1                  | 40       | PZA    |
| AISLANTE 2                  | AISLANTE 2                  | 57       | PZA    |
| AISLANTE 3                  | AISLANTE 2                  | 12       | KG     |
| REFRACTARIO 1 (15% ALÚMINA) | REFRACTARIO 1 (15% ALÚMINA) | 42       | KG     |
| REFRACTARIO 2 (65% ALÚMINA) | REFRACTARIO 2 (60%ALÚMINA)  | 927      | KG     |
| REFRACTARIO 3 (88% ALÚMINA) | REFRACTARIO 2 (60% ALÚMINA) | 3381     | KG     |
| REFRACTARIO 4 (50% ALÚMINA) | REFRACTARIO 2 (60%ALÚMINA)  | 701      | KG     |

### 4.3.11 Análisis térmico

Se utilizan condiciones ideales para el análisis de este horno, las cuales se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 56 Variables de análisis térmico.

| CONDICIÓN                 | VALOR | UNIDAD             |
|---------------------------|-------|--------------------|
| TEMPERATURA AMBIENTE      | 28    | °C                 |
| TEMPERATURA INTERNA       | 1,000 | °C                 |
| COEFICIENTE DE CONVECCIÓN | 15    | W/m <sup>2</sup> K |

Los resultados que se obtienen se muestran en las siguientes imágenes:

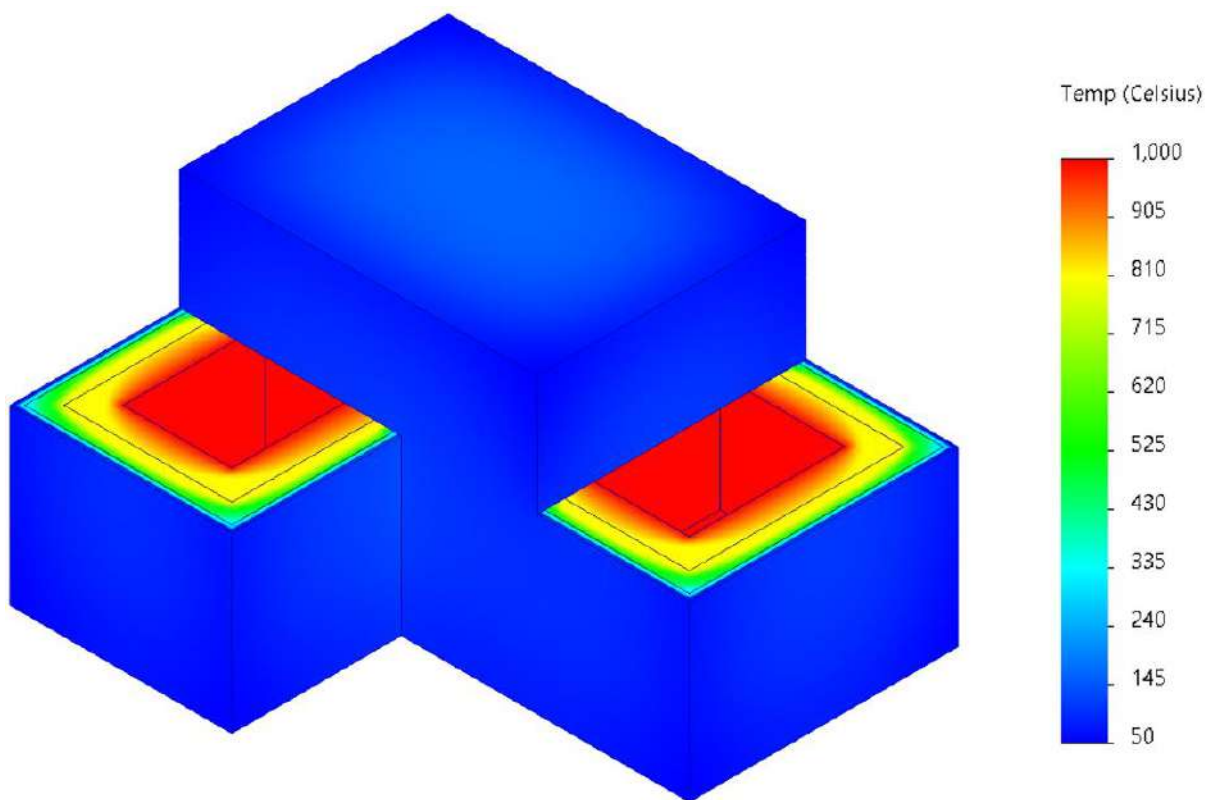


Imagen 102 Resultado de análisis, vista isométrica. Elaboración propia

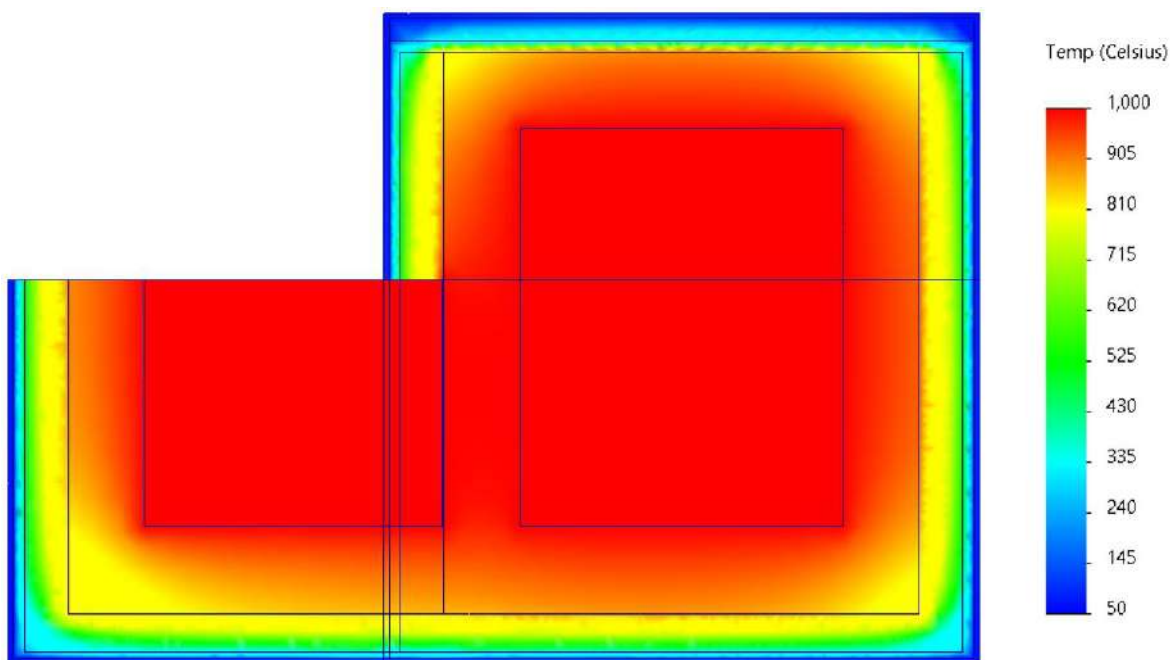


Imagen 103 Resultado de análisis, corte lateral. Elaboración propia

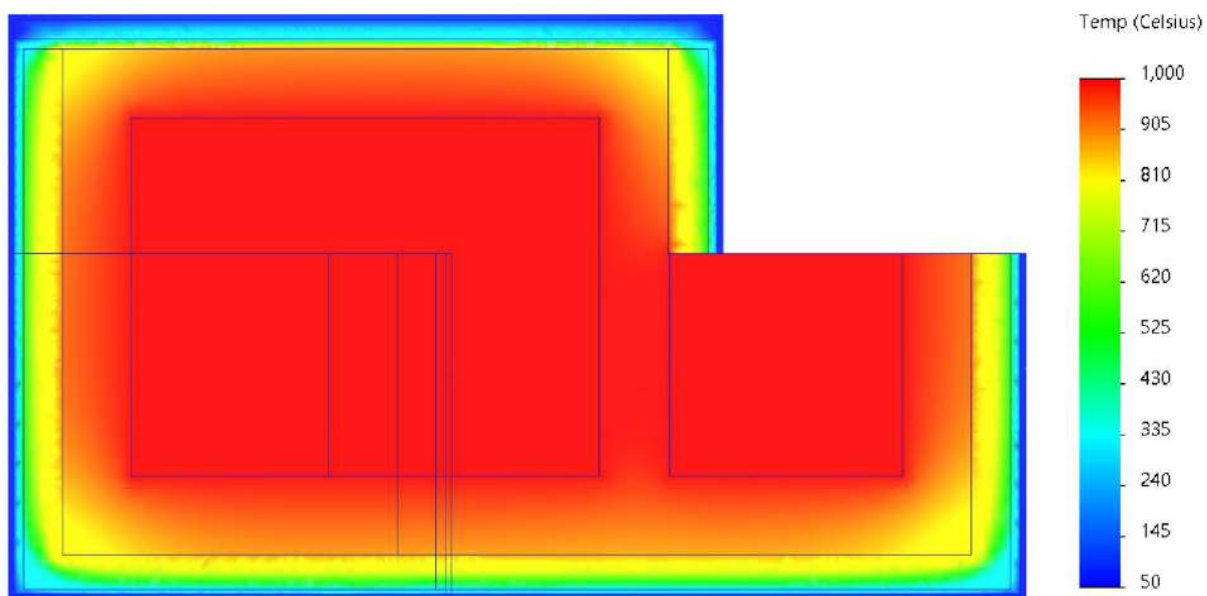


Imagen 104 Resultado de análisis, corte frontal. Elaboración propia

Se realizan mediciones a lo largo de la cara fría, las cuales arrojan los siguientes resultados:

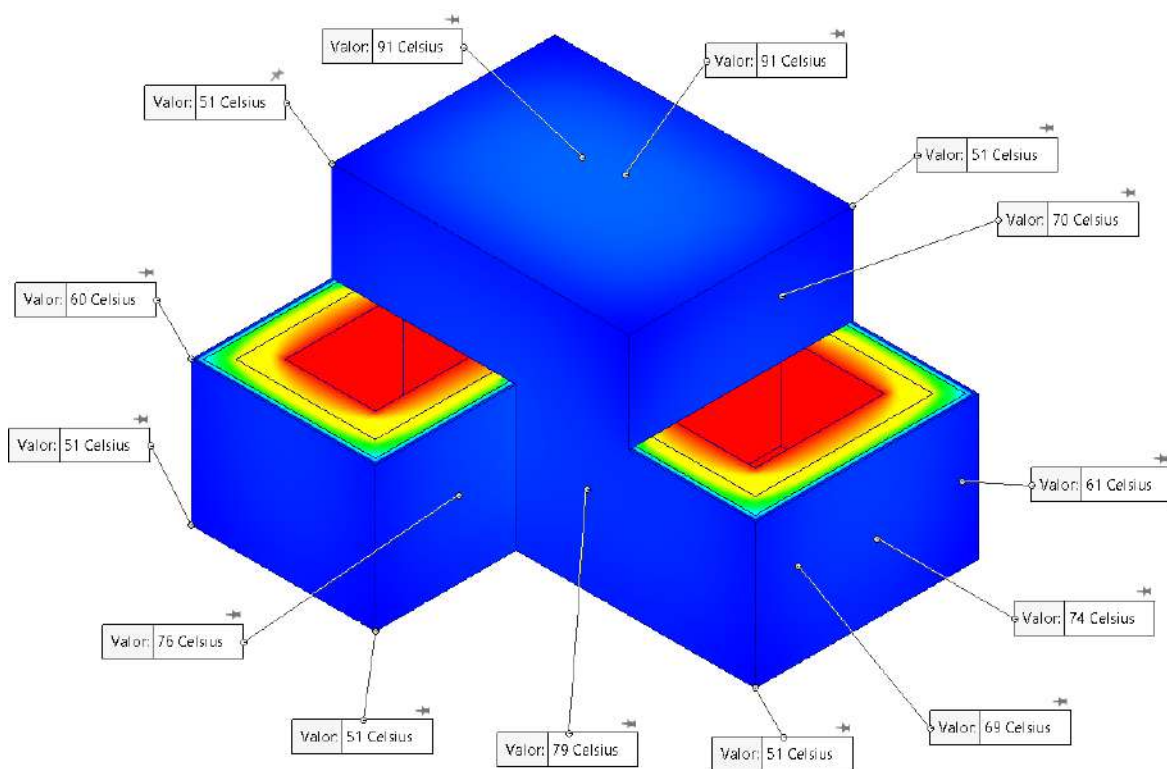


Imagen 105 Mediciones en cara fría, vista isométrica. Elaboración propia

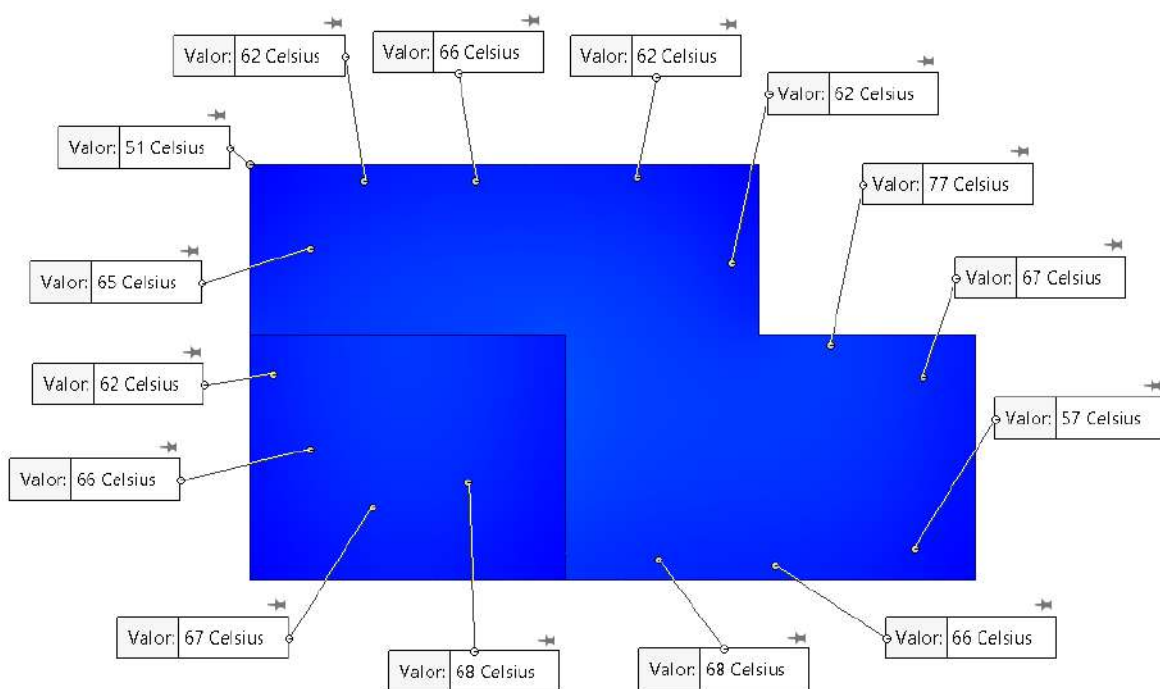


Imagen 106 Mediciones en cara fría, vista lateral. Elaboración propia

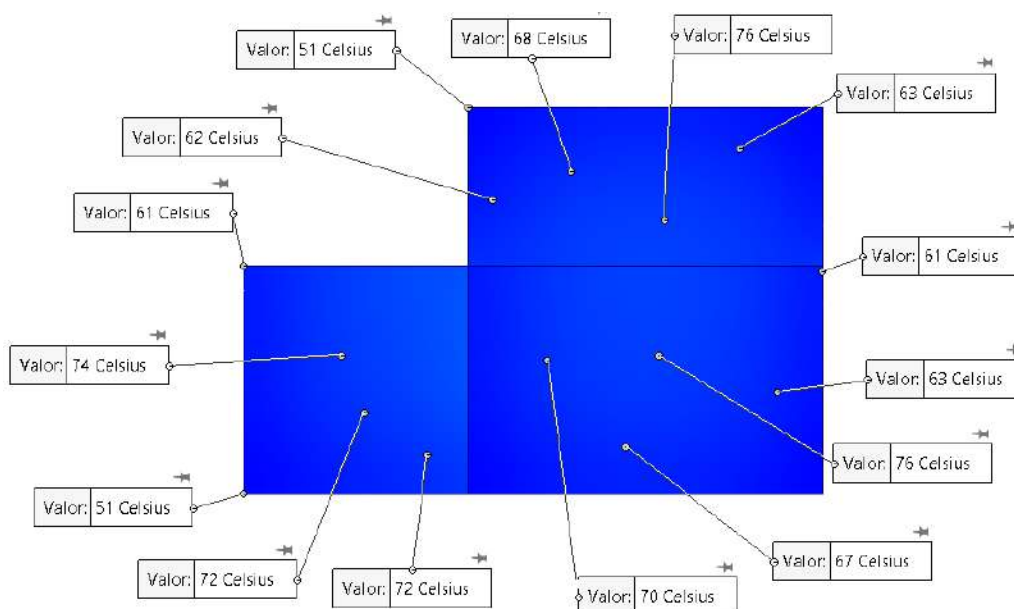


Imagen 107 Mediciones en cara fría, vista frontal. Elaboración propia

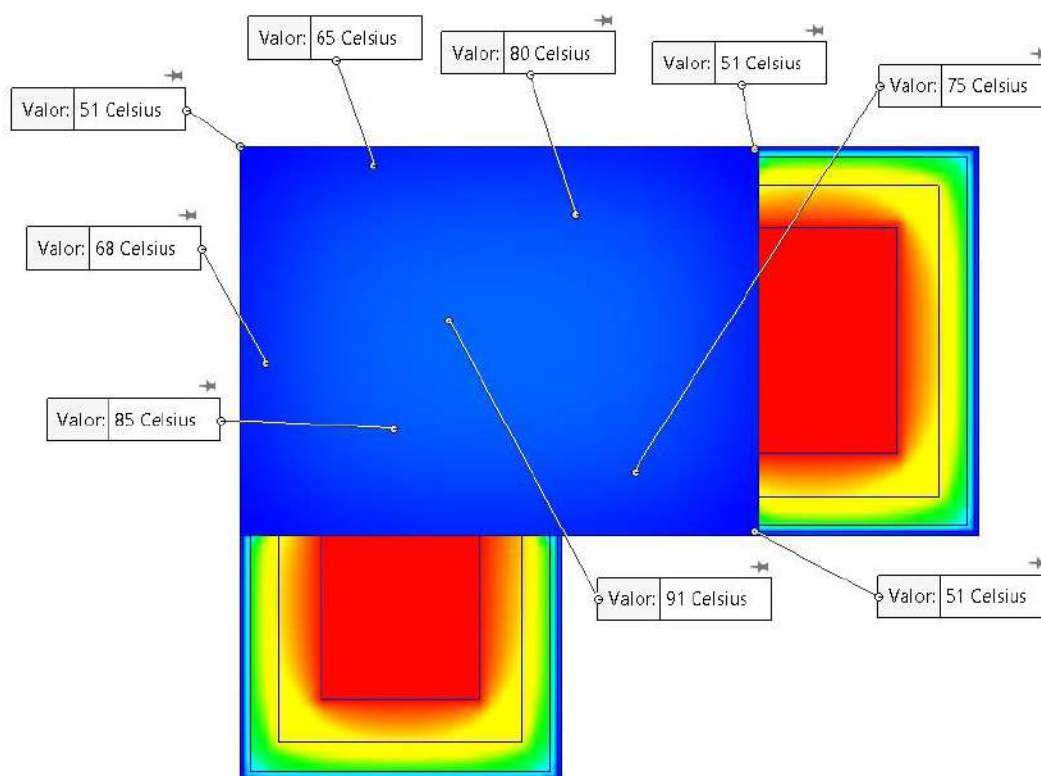


Imagen 108 Mediciones en cara fría, vista superior. Elaboración propia

Para más información sobre esta propuesta, consultar los planos y memoria de cálculo en la sección “Anexos”.



#### **4.3.12 Interpretación de los resultados**

Con el cambio de materiales y manteniendo el espesor original, se reduce en 496 kg la cantidad de concreto refractario.

La variación de temperatura entre la propuesta con materiales originales y la propuesta con materiales propuestos varía aproximadamente de 2 a 5°C, dependiendo de la zona donde se mida. El análisis que utiliza materiales propuestos tiene menor temperatura en cara fría.

Al reducir el espesor del modelo que utiliza materiales propuestos, se ahorran 1,011 kg. La temperatura de la propuesta con espesor reducido y materiales propuestos aumenta 1.5°C en comparación con la que usa materiales propuestos y espesor original.

#### **4.3.13 Conclusión**

Tras analizar las tres propuestas, se demuestra que seleccionar la que utiliza nuevos materiales es la mejor opción de rediseño debido a las ventajas que ofrece.

En primer lugar, se logra una reducción en la cantidad de material a utilizar, lo que permite ahorrar en costos asociados a la adquisición, transporte y mano de obra necesaria para instalarlos. Además, mejora la retención de calor dentro del horno, ya que se presenta una temperatura menor en la cara fría, lo que resulta en un entorno de trabajo más cómodo para el personal.

Por lo tanto, se sugiere optar por la propuesta que utiliza los materiales propuestos, ya que proporciona un mejor equilibrio entre costos y eficiencia térmica.

## 4.4 Horno de secado

### 4.4.1 Análisis del problema

Es necesario rediseñar un horno de secado que se ajuste a las necesidades internas de la empresa y a los requerimientos del proceso. El diseño de este horno contempla dos partes principales: una móvil y una fija. La parte móvil sirve para introducir y extraer los elementos a tratar, mientras que la parte fija funcionará como el cuerpo del horno donde se colocará el aislamiento térmico. El proceso de diseño será el mismo que se describe en el punto 3.5.3.1.

Al igual que en rediseños anteriores, es necesario determinar la cantidad exacta de material que se utilizará y realizar un análisis térmico del mismo. Esto permitirá conocer la cantidad monetaria por desembolsar y elaborar presupuestos necesarios para el nuevo servicio de secado.

Una de las principales diferencias de este horno con otros es que no se cuenta con un plano de diseño. Sin embargo, al disponer de una carcasa metálica físicamente en las instalaciones, es posible realizar un levantamiento técnico que permita obtener toda la información necesaria para realizar el modelado 3D. Este levantamiento técnico permitirá capturar las dimensiones y características exactas del horno, facilitando así su rediseño y asegurando que se ajuste perfectamente a las necesidades de la empresa. La información obtenida es la siguiente:

1.- Se han obtenido las medidas de las siguientes secciones externas.

*Tabla 57 Medidas horno de secado*

| MEDIDAS                   |
|---------------------------|
| ALTURA                    |
| LONGITUD                  |
| ANCHO                     |
| ALTURA DE LA CHIMENEA     |
| ALTURA DE LA BASE MÓVIL   |
| DIAMETRO DE CHIMENEA      |
| ESPESOR DE PLACA METÁLICA |

## 2.- Aislamiento térmico

Tabla 58 Materiales

| MATERIAL             |
|----------------------|
| AISLANTE             |
| LADRILLO REFRACTARIO |

### 4.4.2 Diseño conceptual

Utilizando la información obtenida del levantamiento técnico, se genera un bosquejo general de la forma que tiene el horno, para luego realizar el modelado detallado. Este bosquejo se muestra en la siguiente imagen:

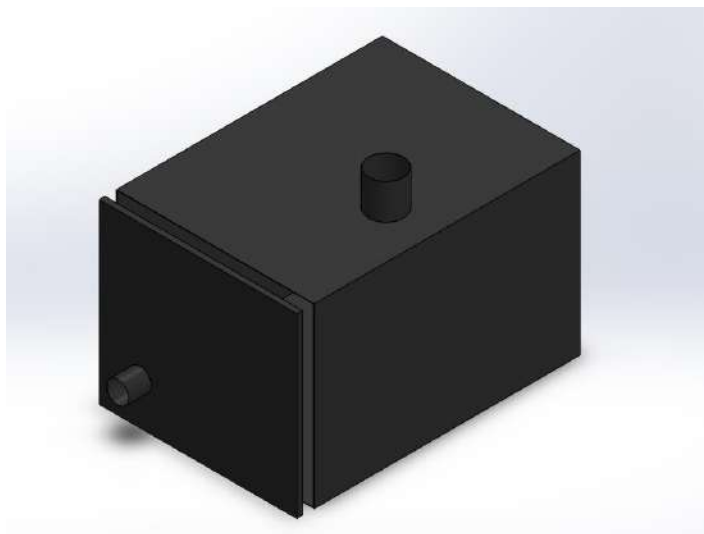
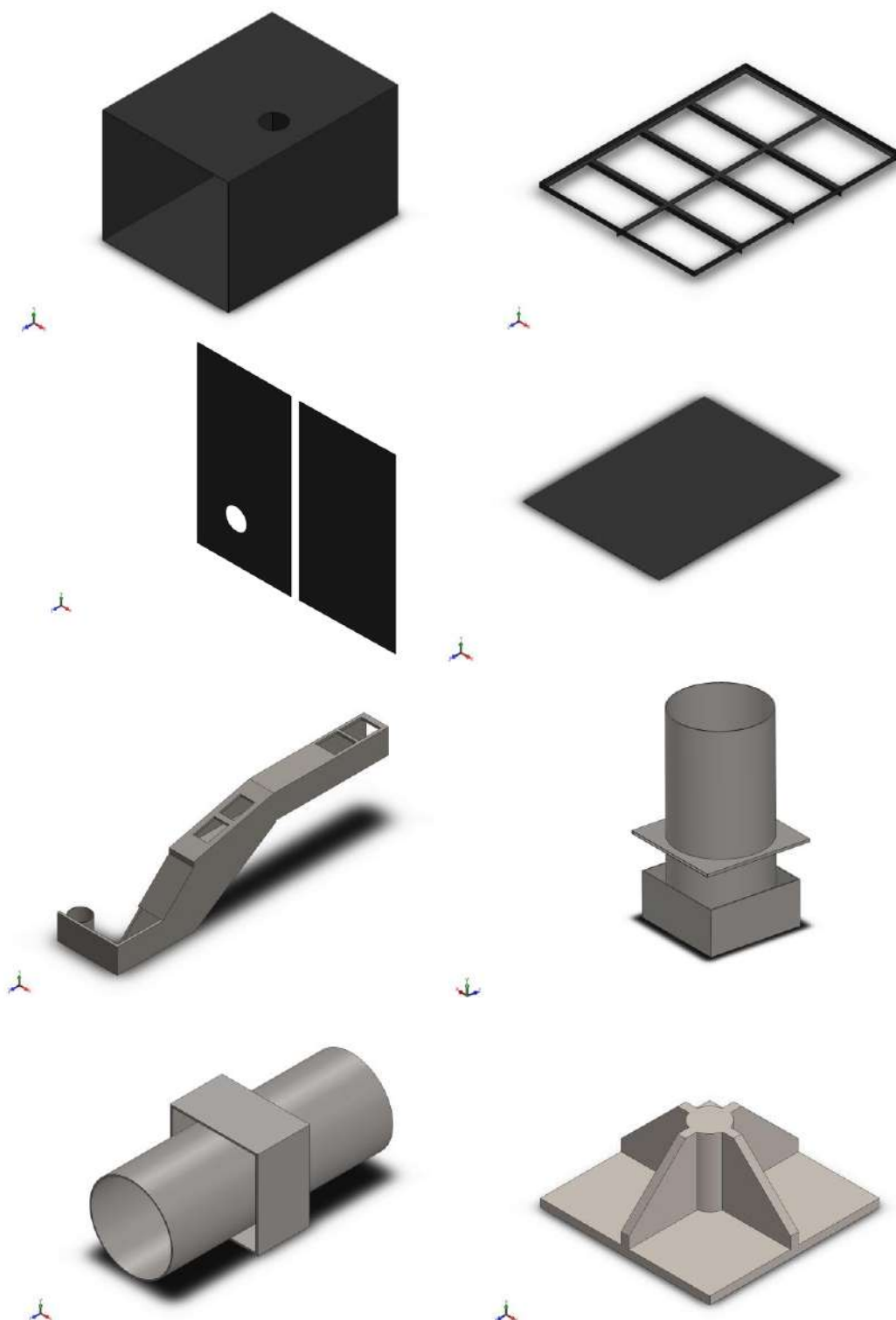


Imagen 109 Modelo inicial. Elaboración propia

### 4.4.3 Representación de esquemas

#### 4.4.3.1 MODELADO DE PIEZAS

Debido a los detalles adicionales en la carcasa metálica que deben ser considerados, es necesario diseñar cada una de las piezas y luego ensamblarlas en un modelo general. Algunas de las piezas generadas se muestran en las siguientes imágenes:



*Imagen 110 Piezas adicionales del horno de secado. Elaboración propia*

El ensamblaje de estas piezas debe seguir el procedimiento descrito en el punto 3.5.3.2. El ensamblaje resultante se muestra en la siguiente imagen:

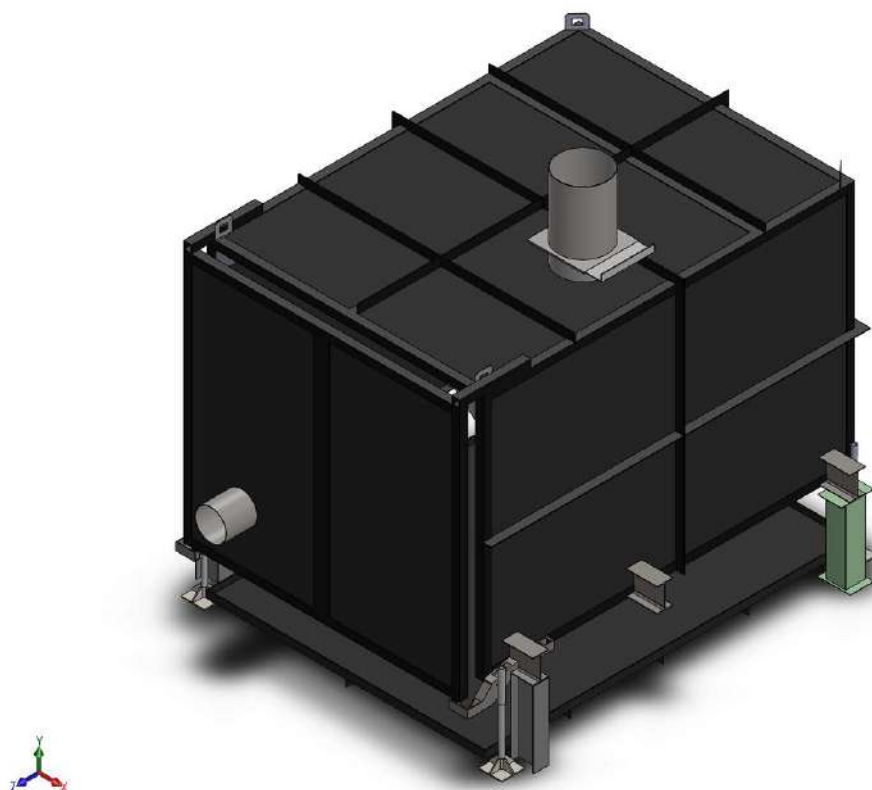


Imagen 111 Ensamble, vista isométrica. Elaboración propia

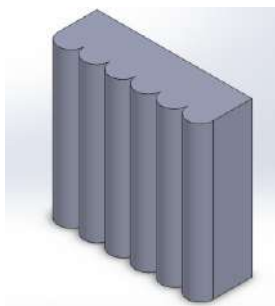


Imagen 112 Vistas isométrica y superior de ensamble. Elaboración propia

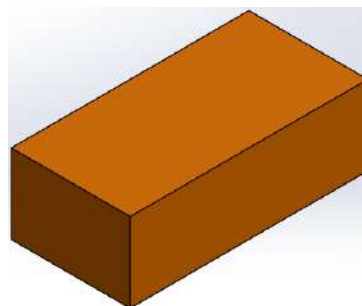


Imagen 113 Vistas lateral y frontal de ensamble. Elaboración propia

Tras completar este modelo, se continúa con el diseño de los materiales aislantes:



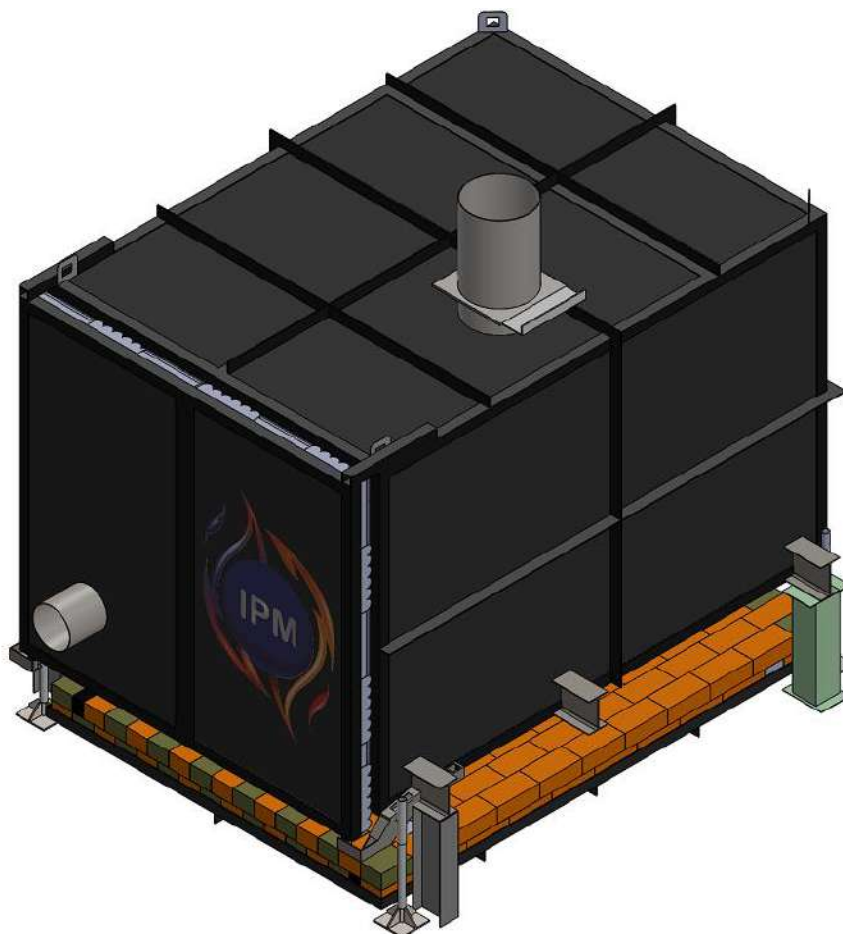
*Imagen 114 Aislante. Elaboración propia*



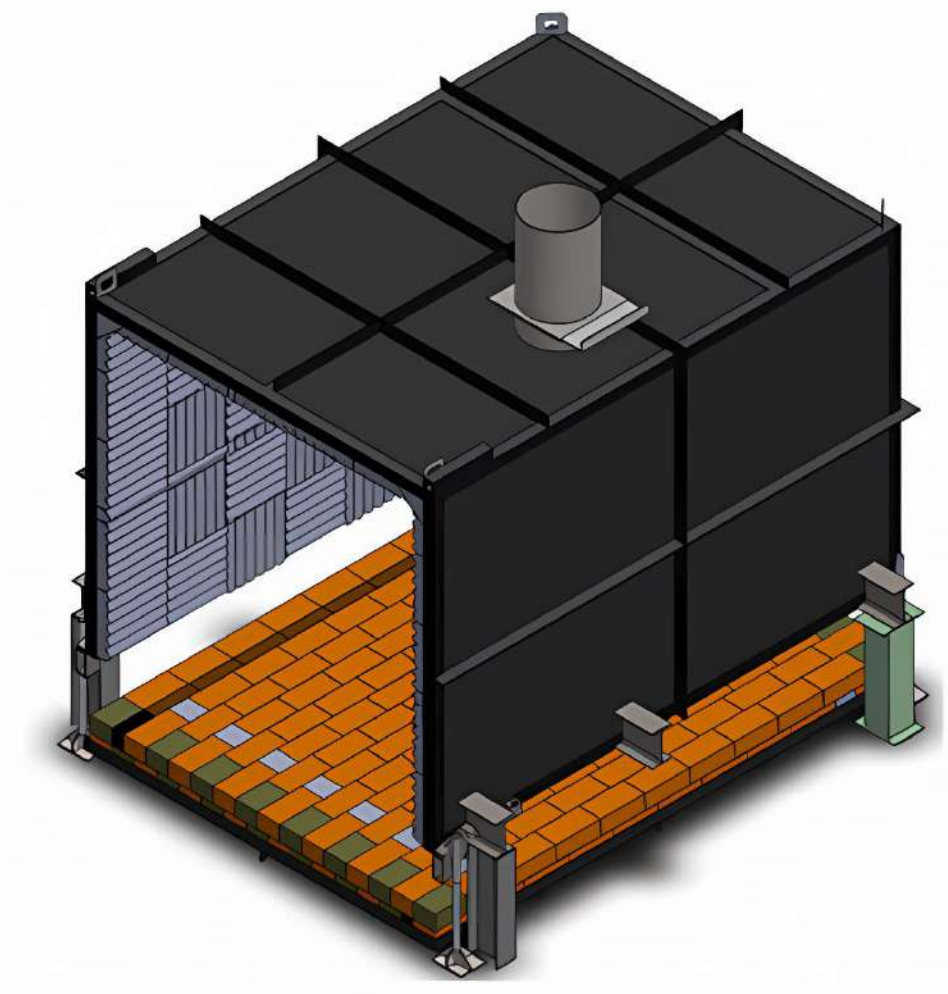
*Imagen 115 Ladrillo. Elaboración propia*

#### 4.4.3.2 Modelo final

Finalmente, se muestra a continuación el modelo completo, que incluye la carcasa metálica, los módulos aislantes y los ladrillos refractarios:



*Imagen 116 Ensamble final, vista isométrica. Elaboración propia*



*Imagen 117 Ensamble final, vista isométrica, puertas retiradas. Elaboración propia*

#### **4.4.4 Desarrollo de detalles**

##### Cálculo de material

Debido a los acuerdos de confidencialidad previamente firmados, se ha optado por omitir la información correspondiente a esta sección, que incluye las cantidades exactas de materiales utilizados en este diseño. Esto se hace con el fin de proteger los intereses y la privacidad de los involucrados.

#### 4.4.5. Análisis térmico

Se utilizan condiciones ideales para el análisis de este horno, las cuales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 59 Variables de análisis térmico

| CONDICIÓN                 | VALOR | UNIDAD |
|---------------------------|-------|--------|
| TEMPERATURA AMBIENTE      | 28    | °C     |
| TEMPERATURA INTERNA       | 900   | °C     |
| COEFICIENTE DE CONVECCIÓN | 15    | W/M2 K |

Debido a la naturaleza del horno, no es necesario establecer una temperatura interna para la base de ladrillos, ya que, en condiciones de funcionamiento, esta base no entrará en contacto directo con el calor. Sin embargo, las demás zonas del horno sí estarán expuestas a altas temperaturas. Los resultados obtenidos al ejecutar el estudio se muestran a continuación:

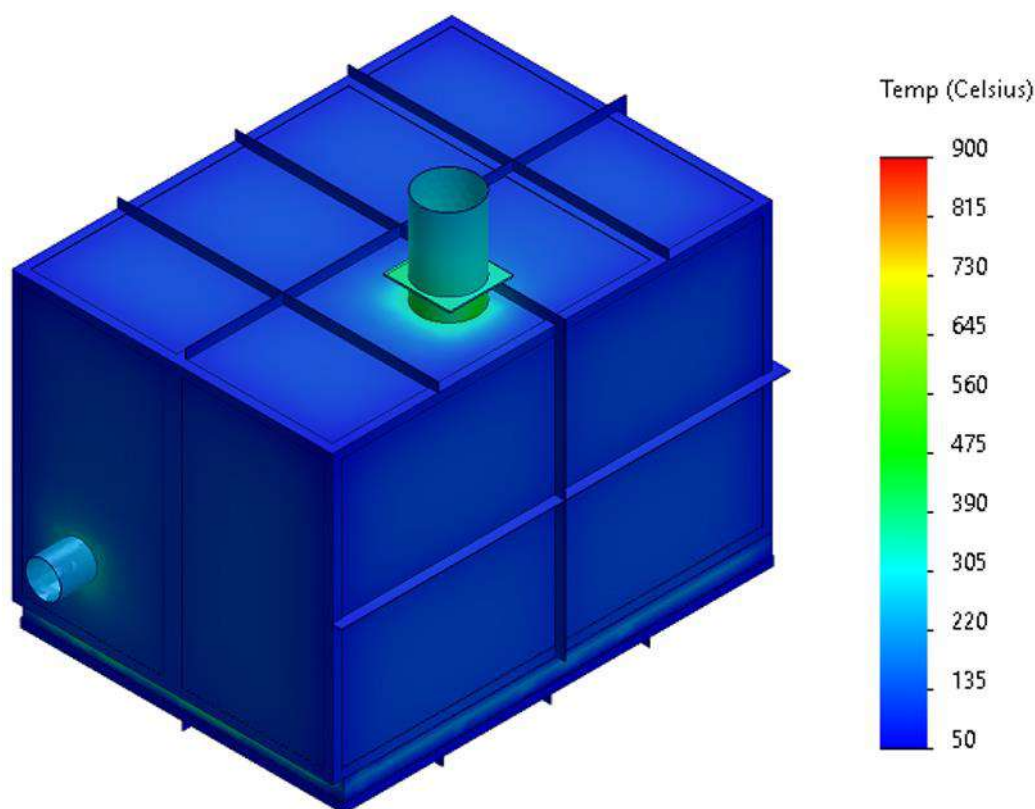


Imagen 118 Resultado de análisis, vista isométrica. Elaboración propia

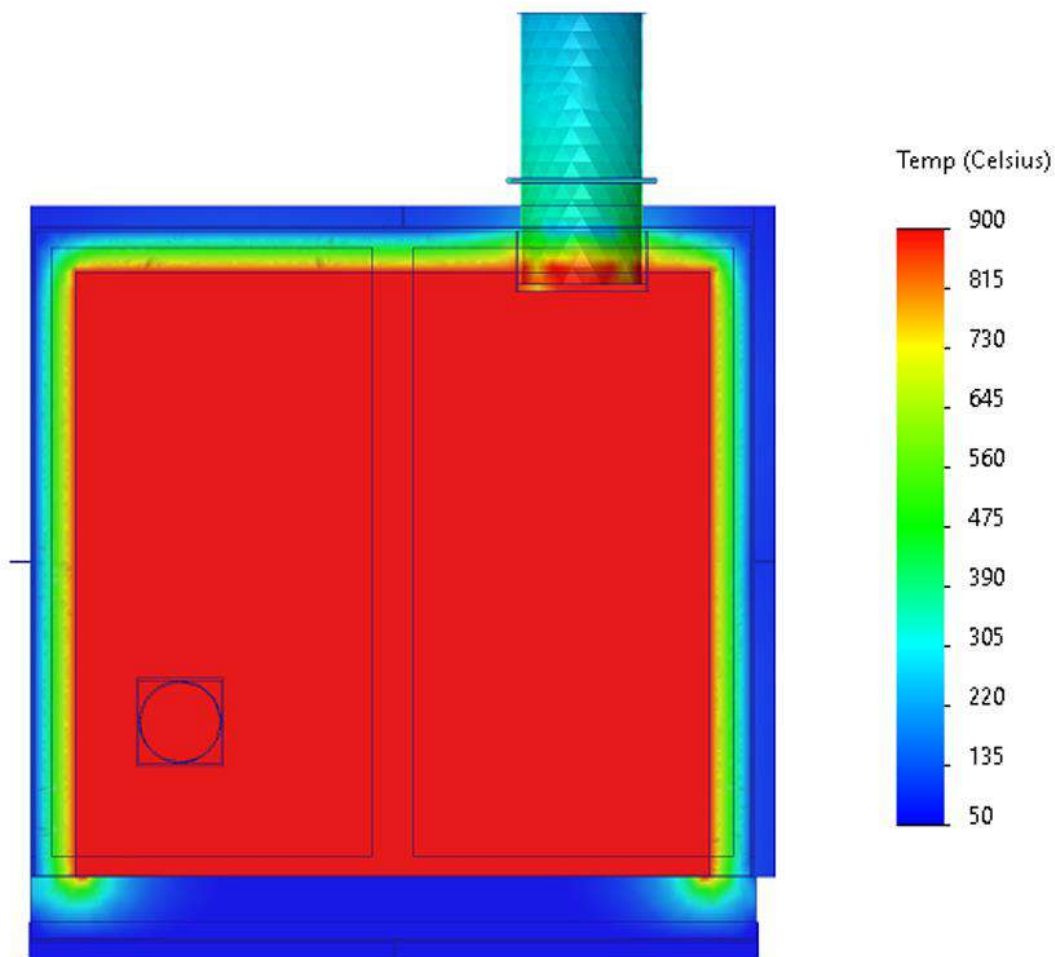


Imagen 119 Resultado de análisis, corte frontal. Elaboración propia

Se realizan diversas mediciones a lo largo del modelo para determinar la variación de temperatura en la cara fría.

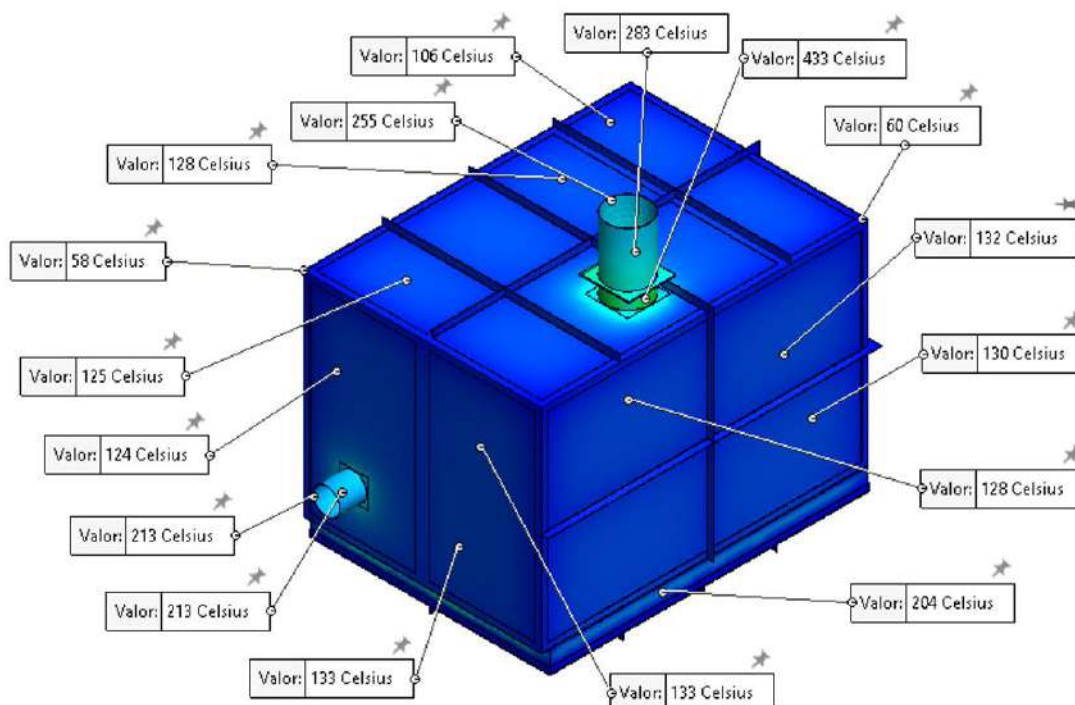


Imagen 120 Mediciones en cara fría, vista isométrica. Elaboración propia

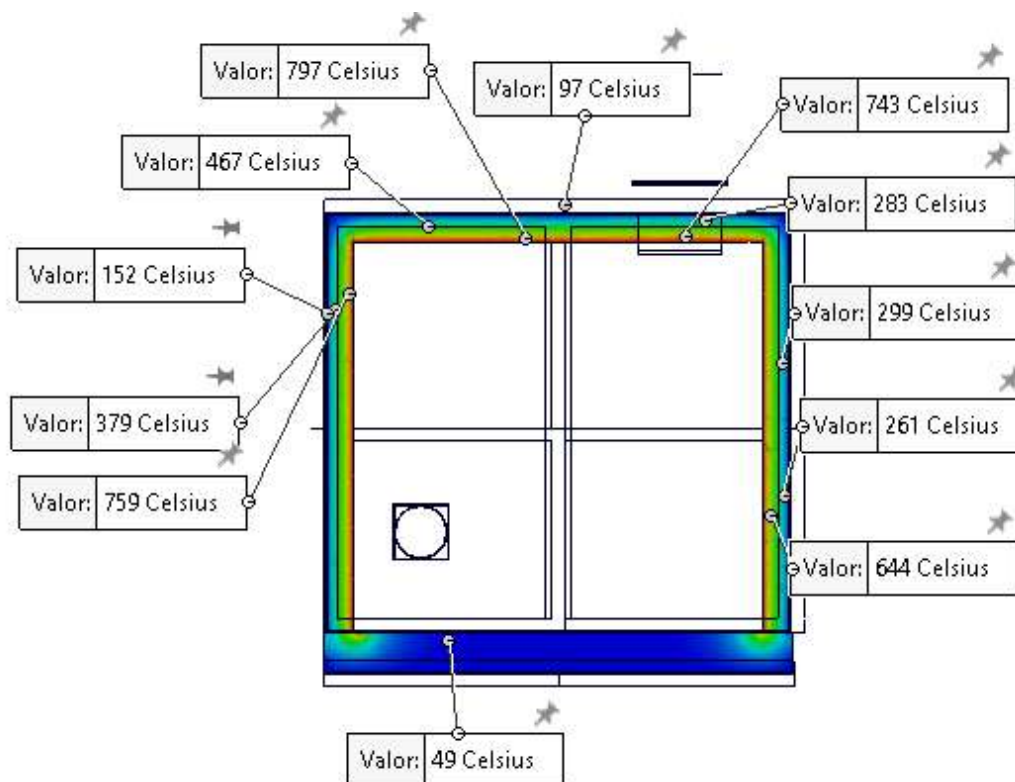


Imagen 121 Mediciones en cara fría, corte frontal. Elaboración propia



Estas condiciones de comportamiento de temperatura pueden diferir de las reales debido al modo de aplicación del calor. En la simulación, se considera una temperatura constante en las caras internas; sin embargo, en la realidad, esto no es así debido a que el calor se aplica mediante una llama.

#### **4.4.6 Conclusión**

Esta propuesta de rediseño representa una iniciativa original al utilizar nuevos materiales y una configuración distinta en comparación con otros hornos de secado. Además, este enfoque innovador presenta diversas oportunidades de mejora que pueden aumentar la eficiencia del horno o mejorar su proceso de operación, debido a sus características de diseño.

Se recomienda considerar esta propuesta de rediseño, ya que ofrece una solución original y flexible, capaz de adaptarse a las necesidades cambiantes de la empresa.

## 4.5 Horno de fundición tipo reverbero

### 4.5.1 Análisis del problema

Es necesario elaborar una propuesta de rediseño para la construcción de un horno reverbero, que contemple la cantidad de material necesaria para ello y, en este caso, la cantidad de material que será necesario demoler antes de instalar el nuevo. Ambas consideraciones deben seguir el procedimiento descrito en el punto 3.5.3.1.

En esta ocasión, se realizó un levantamiento técnico del cual se obtuvieron los valores de las siguientes secciones:

*Tabla 60 Medidas*

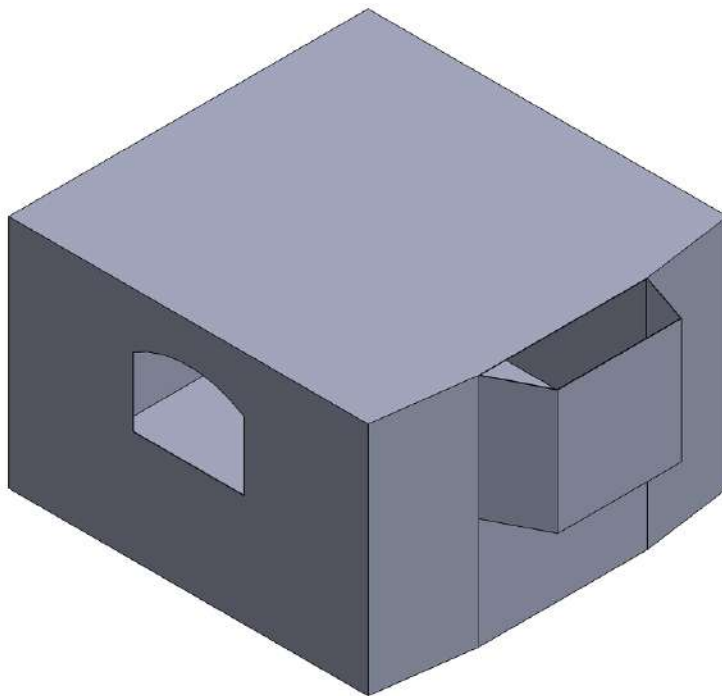
| MEDIDAS                   |
|---------------------------|
| ALTURA                    |
| LONGITUD                  |
| ANCHO                     |
| ANCHO DE LA CHIMENEA      |
| LARGO DE LA CHIMENEA      |
| ALTURA DE LA CHIMENA      |
| LARGO DE LA PUERTA        |
| ALTURA DE LA PUERTA       |
| ANCHO DE LA PUERTA        |
| ESPESOR DE PLACA METÁLICA |

#### Cantidad por demoler

El horno presenta un desgaste evidente en el recubrimiento interno y tiene material adherido en las paredes y la bóveda. Todo esto debe ser demolido para instalar el nuevo material. Sin embargo, para conocer el tiempo necesario para retirarlo en su totalidad y determinar el costo de la mano de obra, es esencial conocer la cantidad de material que posee actualmente. Este dato se obtendrá mediante la realización de un modelo 3D, utilizando como base los datos obtenidos de un levantamiento técnico realizado previamente.

### 4.5.2 Diseño conceptual

A partir de la información obtenida previamente, se crea un modelo 3D de la carcasa metálica del horno. Este modelo se muestra en la imagen:



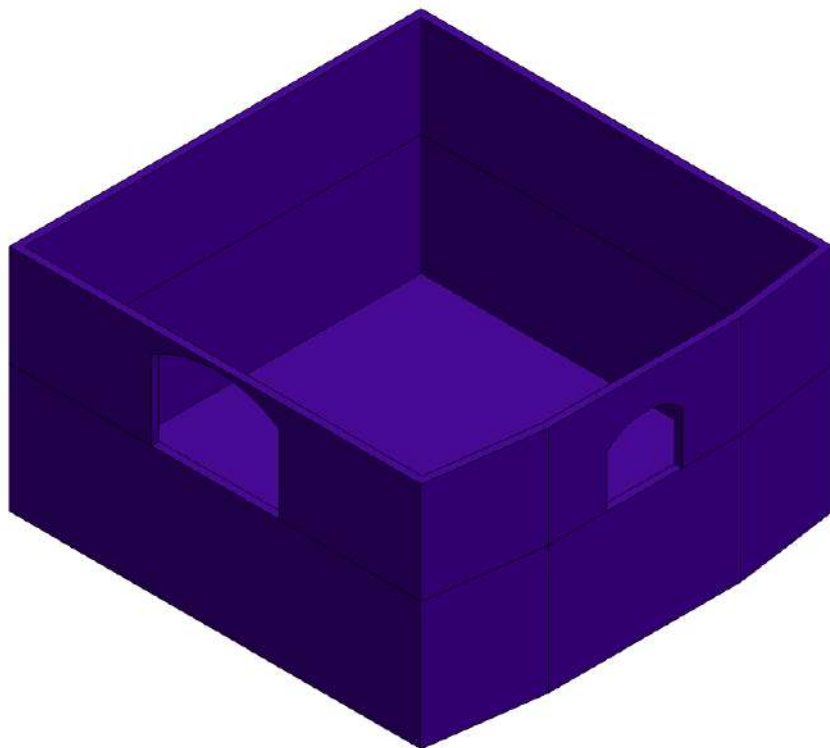
*Imagen 122 Carcasa metálica. Elaboración propia*

Este modelo puede ser reutilizado en fases posteriores del diseño, esto una vez que haya sido aprobado.

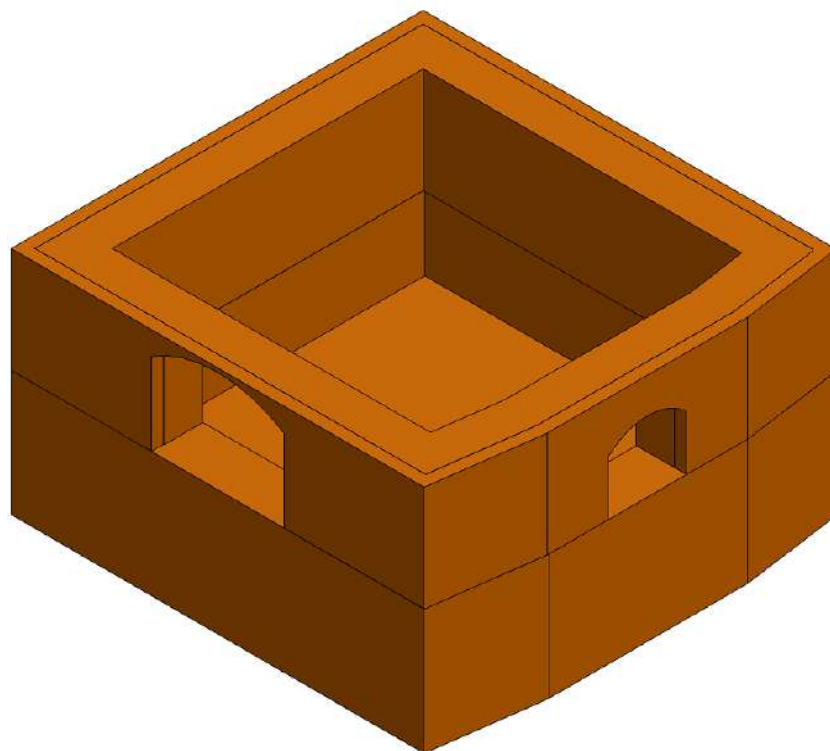
### 4.5.3 Representación de esquemas 1 (cantidad por demoler)

Lo siguiente es realizar el modelado 3D que represente la situación actual del horno, con el fin de determinar la cantidad de material que debe ser retirada antes de llevar a cabo los trabajos de construcción. Dado que no se conocen con exactitud los materiales usados en la construcción del horno, se diferenciarán únicamente como “Aislante” y “Refractario”.

Las capas modeladas se muestran en las siguientes imágenes:

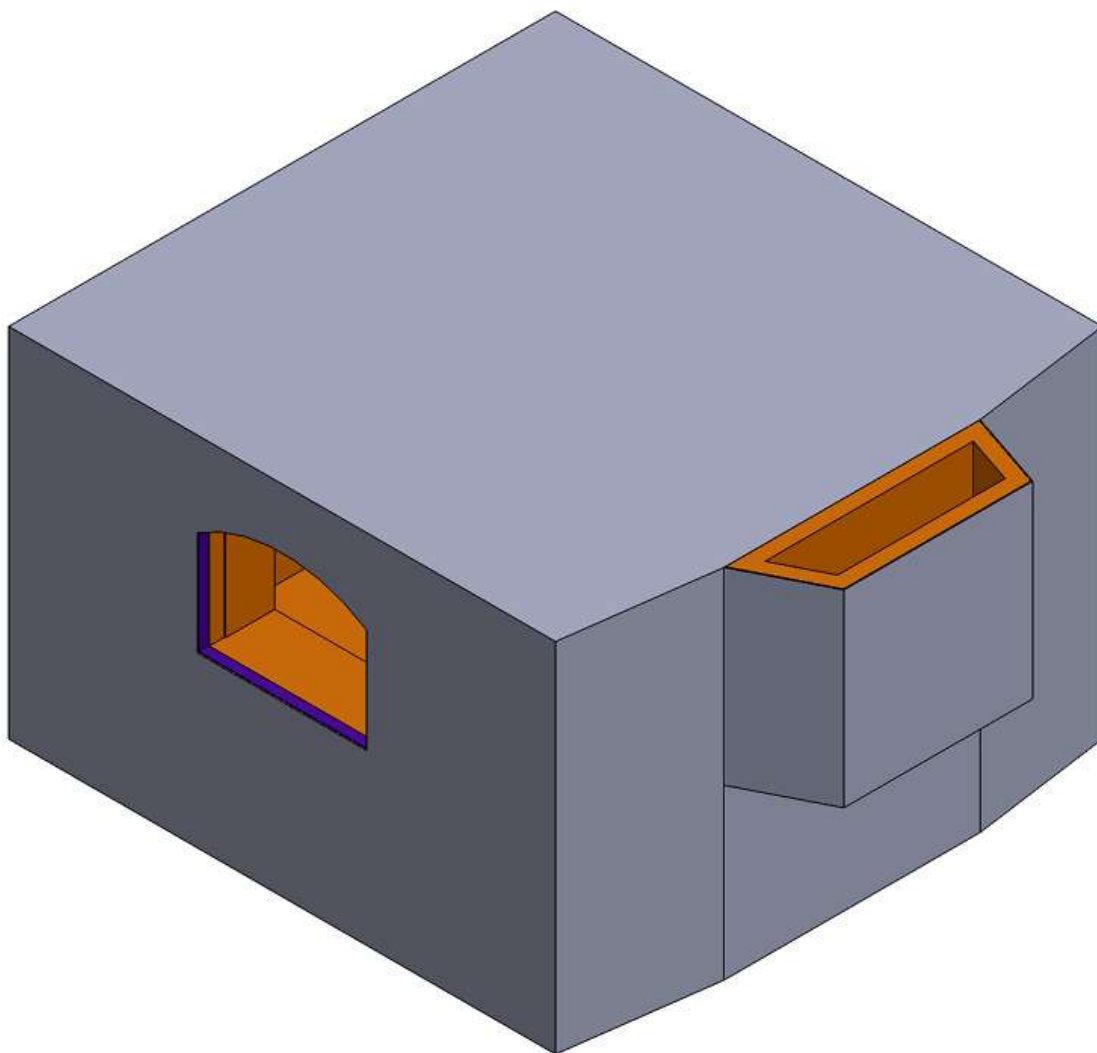


*Imagen 123 Aislante, vista isométrica. Elaboración propia*

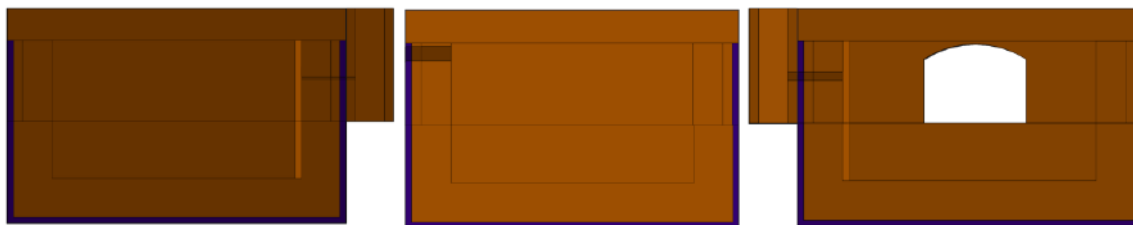


*Imagen 124 Refractario, vista isométrica. Elaboración propia*

Todas estas piezas se ensamblan de acuerdo con lo descrito en el punto 3.5.3.2



*Imagen 125 Ensamble, vista isométrica. Elaboración propia*



*Imagen 126 Vistas frontal, lateral y trasera desde el interior del horno. Elaboración propia*

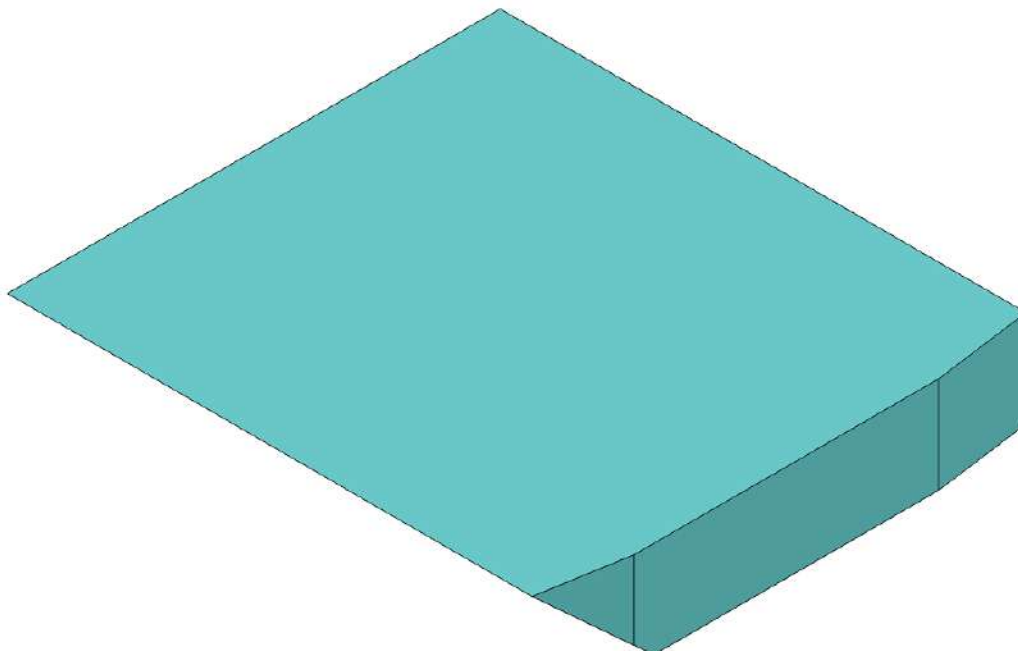
#### 4.5.4 Desarrollo de detalles 1

Una vez finalizado el ensamblaje, se procede a obtener la volumetría conforme al punto 3.5.4.1 y, posteriormente, se realiza el cálculo de la cantidad de material siguiendo los procedimientos descritos en el punto 3.5.4.2. Esto se muestra en la siguiente tabla:

*Tabla 61 Cantidad de material*

| MATERIAL    | MASA (KG) |
|-------------|-----------|
| AISLANTE    | 23225     |
| REFRACTARIO | 152375    |
| TOTAL       | 175600    |

Además, es necesario agregar un cálculo que muestre la cantidad de material que se puede contener en el tanque del horno bajo las condiciones actuales. Para ello, se modela una pieza independiente que se añade posteriormente al ensamblaje anterior. La pieza es la siguiente:



*Imagen 127 Material contenido en tanque. Elaboración propia*

De igual forma, para conocer la masa del material, solo es necesario conocer su volumen y multiplicarlo por la densidad del material. Esto se muestra en la tabla:

Tabla 62 Cantidad de material contenida en tanque

| -        | VOLUMEN<br>(M <sup>3</sup> ) | DENSIDAD | MASA<br>(KG) |
|----------|------------------------------|----------|--------------|
| MATERIAL | 9.2                          | 2700     | 24840        |

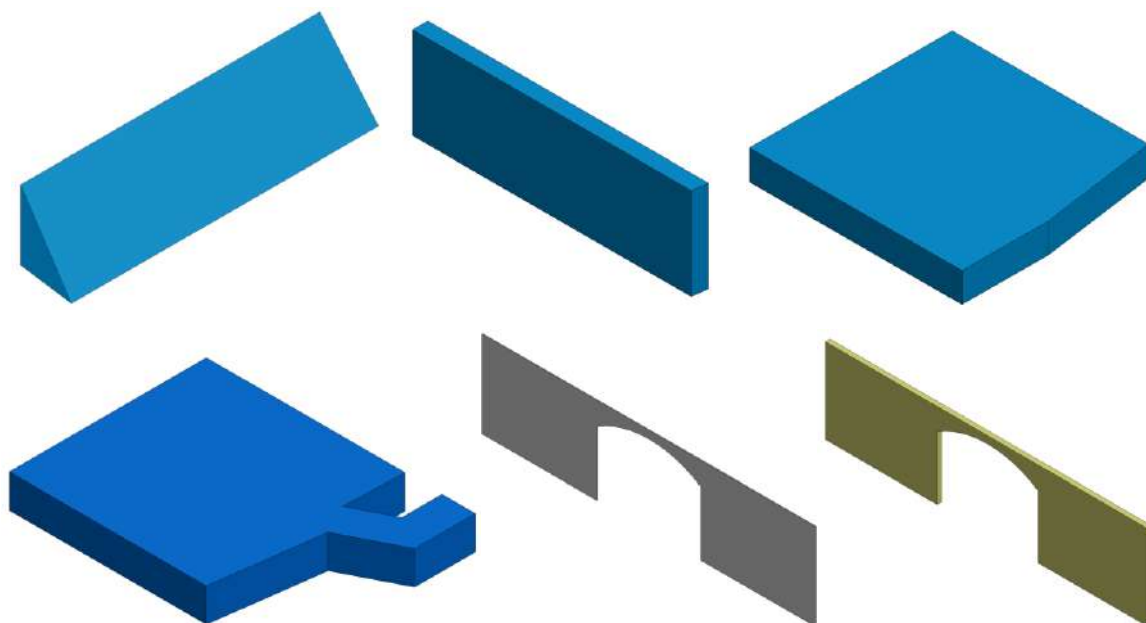
Estos datos se incluirán en los planos técnicos, los cuales pueden ser consultados en la sección “Anexos”.

#### 4.5.5 Representación de esquemas 2 (rediseño de horno)

Antes de iniciar el diseño, se deben considerar las siguientes modificaciones:

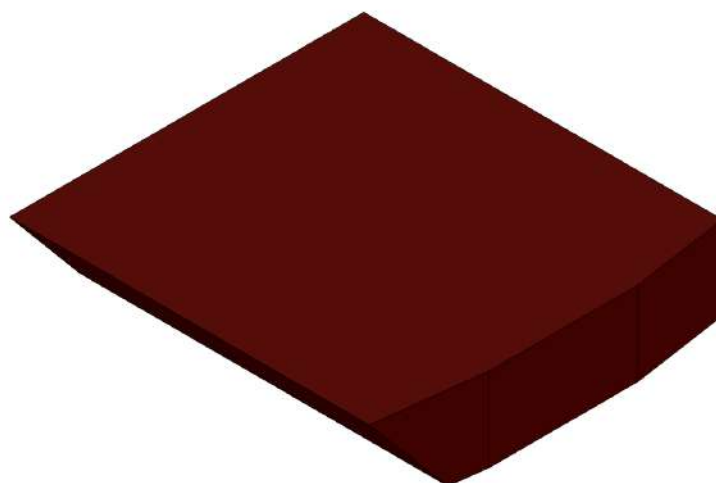
- Se reduce el espesor total del recubrimiento interno.
- Se utilizan cuatro materiales diferentes: aislante 1 (fibra cerámica), aislante 2 (fibra cerámica), refractario 1 (50% alúmina) y refractario 2 (60% alúmina).
- Se añade una tercera capa de aislante (fibra cerámica) que se colocará sobre la bóveda.

Los cambios realizados internamente no afectan a la carcasa metálica; por lo tanto, es posible utilizar el mismo archivo para este nuevo modelo. Se aplica el proceso descrito en el punto 3.5.3.1. Algunas piezas modeladas se muestran en las siguientes imágenes



*Imagen 128 Piezas diseñadas. Elaboración propia*

Antes de proceder con el ensamblaje y la obtención de la volumetría, es necesario crear una pieza que represente el material contenido en el tanque, similar a lo que se hizo para el plano de la situación actual, como se muestra en la imagen:



*Imagen 129 Material contenido en tanque. Elaboración propia*

Finalmente, todas las piezas deben ser ensambladas siguiendo el proceso descrito en el punto 3.5.3.2. El ensamblaje obtenido es el siguiente:

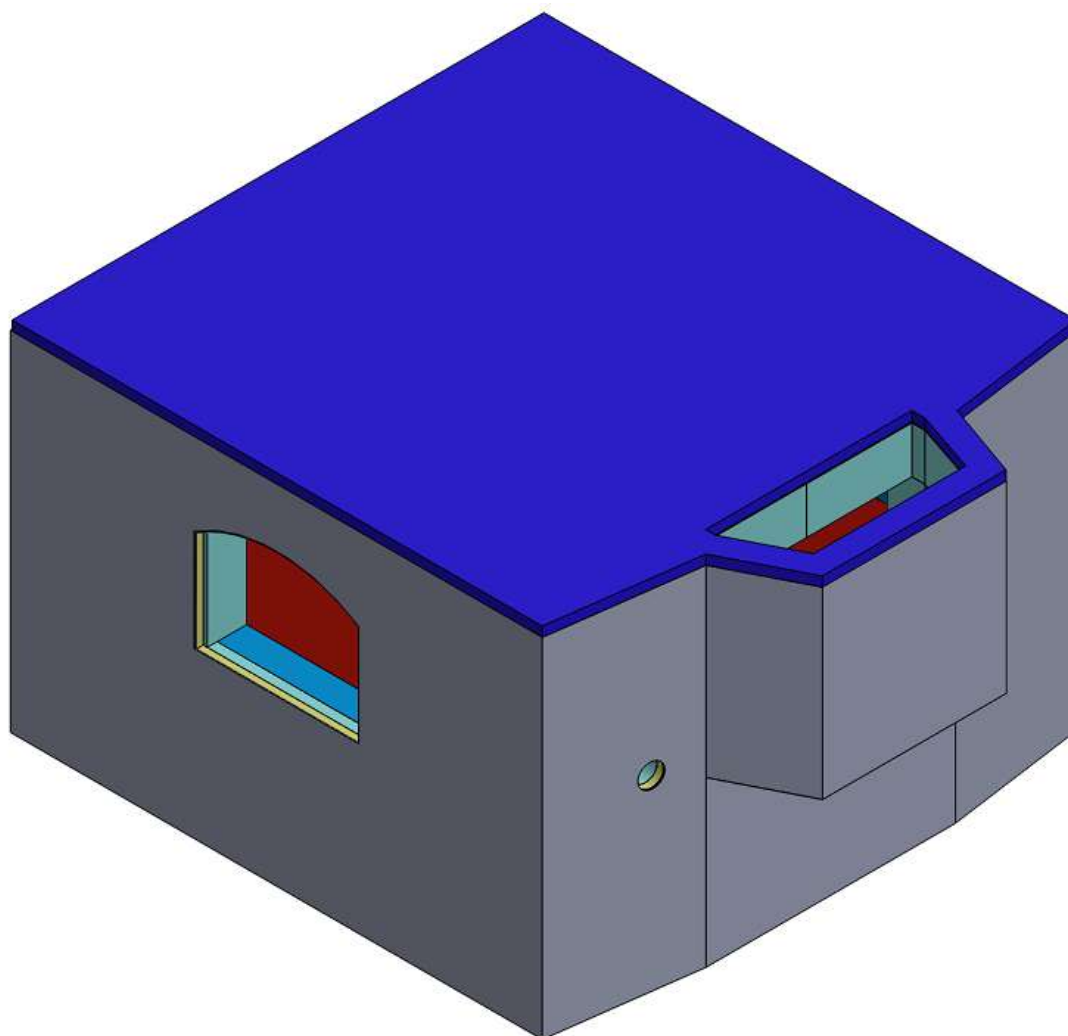


Imagen 130 Ensamble final del horno, vista isométrica. Elaboración propia

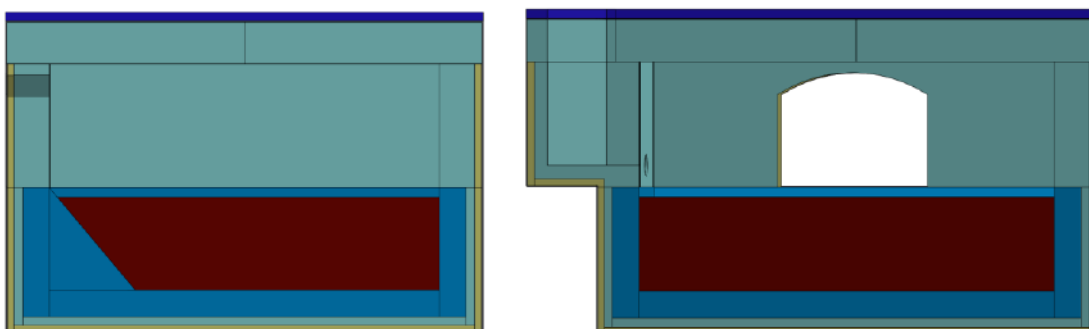


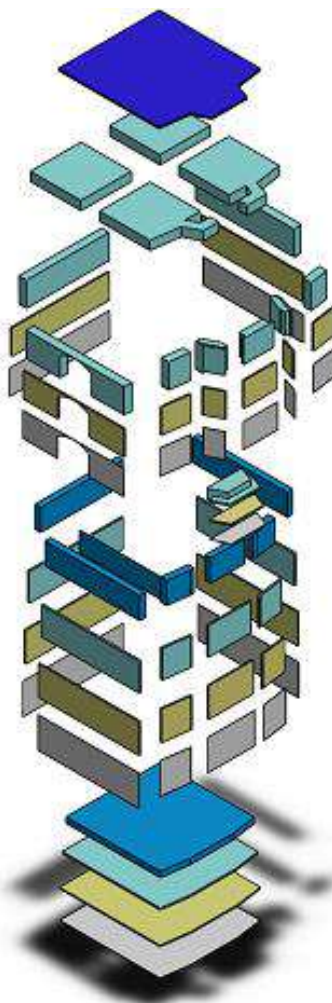
Imagen 131 Vistas lateral y frontal desde el interior del horno. Elaboración propia

#### 4.5.6 Vista explosionada

Para este horno, se deben realizar dos vistas explosionadas diferentes para obtener más de un punto de vista sobre su construcción. Con múltiples perspectivas, se garantiza que todos los detalles del diseño sean claros para todos los involucrados en el proyecto. Ambas deben ser realizadas conforme al punto 3.5.3.3.

##### Vista explosionada 1:

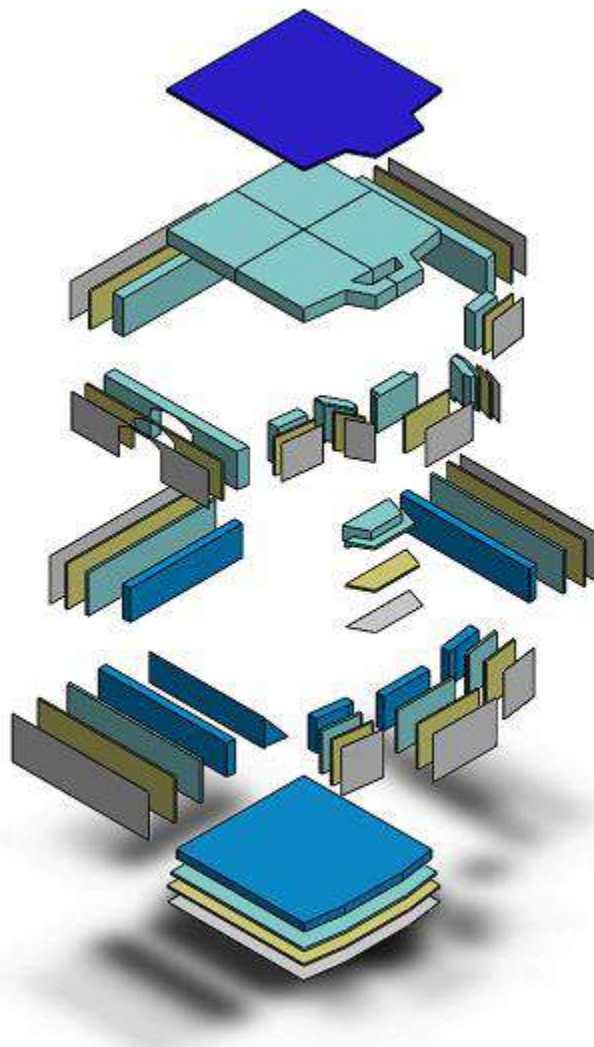
Esta primera vista tiene forma de “torre” debido a que las piezas se han movido verticalmente para permitir su visualización y mostrar cómo será su colocación real. Dicha vista y plano se muestran a continuación:



*Imagen 132 Vista explosionada 1 "Torre". Elaboración propia*

### Vista explosionada 2:

Esta segunda vista debe mostrar exactamente los mismos datos que la anterior; sin embargo, la disposición de las piezas debe cambiar para permitir una mejor apreciación de cada una.



*Imagen 133 Vista explosionada 2. Elaboración propia*

En caso de necesitar más información, consulte los planos técnicos en la sección “Anexos”.

#### 4.5.7 Desarrollo de detalles 2

La volumetría se obtiene mediante los métodos descritos en el punto 3.5.4.1. Una parte de los resultados de la volumetría se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 63 Volumetría de rediseño

| #  | MATERIAL      | ÁREA<br>(M <sup>2</sup> ) | VOLUMEN<br>(M <sup>3</sup> ) |
|----|---------------|---------------------------|------------------------------|
| 1  | REFRACTARIO 1 | 7.51                      | 3.63                         |
| 2  | REFRACTARIO 1 | 7.51                      | 3.63                         |
| 3  | REFRACTARIO 1 | 8.08                      | 3.90                         |
| 4  | REFRACTARIO 1 | 8.05                      | 3.90                         |
| 5  | AISLANTE 3    | 31.31                     | 3.24                         |
| 6  | REFRACTARIO 1 | 6.39                      | 2.60                         |
| 7  | REFRACTARIO 1 | 7.65                      | 3.10                         |
| 8  | REFRACTARIO 1 | 1.65                      | 0.62                         |
| 9  | REFRACTARIO 1 | 1.11                      | 0.27                         |
| 10 | REFRACTARIO 1 | 2.18                      | 0.33                         |
| 11 | REFRACTARIO 1 | 1.18                      | 0.28                         |
| 12 | REFRACTARIO 1 | 1.77                      | 0.63                         |
| 13 | REFRACTARIO 1 | 5.50                      | 2.26                         |
| 14 | REFRACTARIO 1 | 1.33                      | 0.33                         |
| 15 | AISLANTE 2    | 7.56                      | 0.58                         |
| 16 | AISLANTE 2    | 7.79                      | 0.59                         |
| 17 | AISLANTE 2    | 1.94                      | 0.15                         |
| 18 | AISLANTE 2    | 1.18                      | 0.10                         |
| 19 | AISLANTE 2    | 2.49                      | 0.19                         |
| 20 | AISLANTE 2    | 1.25                      | 0.10                         |
| 21 | AISLANTE 2    | 2.03                      | 0.15                         |

Los materiales a utilizar y sus datos técnicos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 64 Datos técnicos de nuevos materiales

| MATERIAL                    | LARGO<br>(m) | ANCHO<br>(m) | ÁREA<br>(m <sup>2</sup> ) | DENSIDAD<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
|-----------------------------|--------------|--------------|---------------------------|----------------------------------|
| AISLANTE 1 (FIBRA CERÁMICA) | 1            | 0.12         | 0.12                      | 224                              |
| AISLANTE 2 (FIBRA CERÁMICA) | 0.6096       | 0.9144       | 0.55742                   | 256                              |
| AISLANTE 3 (FIBRA CERÁMICA) | 6            | 0.61         | 3.66                      | 128                              |
| REFRACTARIO 1 (50% ALÚMINA) | -            | -            | -                         | 2400                             |
| REFRACTARIO 2 (60% ALÚMINA) | -            | -            | -                         | 2510                             |



Finalmente, se realiza el cálculo de la cantidad de material conforme al punto 3.5.4.2.

Sin embargo, se ha omitido la información acerca de las cantidades exactas de material a utilizar en el rediseño de este horno para proteger los intereses y la privacidad de los involucrados, garantizando el cumplimiento de los acuerdos de confidencialidad firmados.

#### **4.5.8 Conclusión**

Los resultados de esta propuesta demuestran su viabilidad debido a las ventajas ofrecidas. Aumentar la capacidad volumétrica del tanque incrementa la eficiencia del horno y la capacidad de producción de la planta. Además, las propiedades físicas de los materiales propuestos extienden la vida útil del recubrimiento refractario.

Asimismo, los planos generados garantizan que la construcción del horno se realice de manera adecuada, definiendo con anticipación las acciones a seguir y previniendo posibles fallas. Su precisión asegura que cada componente encaje perfectamente, facilitando el proceso de construcción.



# CONCLUSIÓN

Este proyecto tuvo como objetivo el uso de herramientas de modelado 3D para contribuir al desarrollo de instalaciones refractarias mediante modelos virtuales. El modelado 3D y el rediseño de hornos han demostrado tener un impacto significativo en la planeación e instalación de estos equipos.

Se demostró que utilizar una metodología para la creación de diseños 3D, facilita el tiempo necesario para crear una o más propuestas de valor que sean finalmente aplicadas en las diversas industrias. Reduciendo tiempos de espera y permitiendo realizar e identificar cambios durante el proceso de diseño, siendo posible evaluar el desempeño de estas de manera sencilla en comparación a métodos tradicionales.

Estas propuestas permiten identificar y corregir posibles problemas durante la construcción, anticipando problemas y definiendo procedimientos adecuados para cada una de las secciones del horno.

Además, estas propuestas permiten anteponerse a problemas que surjan durante la construcción del equipo, definiendo los procesos más adecuados para una correcta instalación de cada una de las secciones de la instalación, pudiendo disminuir costos originados por imprevistos.

Al cambiar los materiales que se utilizan en el revestimiento térmico se obtiene una mejor eficiencia térmica del horno, además de otras ventajas adicionales debido a las propiedades mecánicas de estos. Se reducen los costos asociados con la adquisición, traslado e instalación de estos nuevos materiales.

La metodología desarrollada en este proyecto se aplicó en un grupo pequeño de hornos, sería importante aplicarla en una muestra más amplia para validar su eficacia y asegurar que las propuestas que la usen sean efectivas en diversas situaciones. Se sugiere además comparar los resultados de las instalaciones en sitio con los resultados del software para evaluar su eficacia con datos reales.



# COMPETENCIAS DESARROLLADAS

En la elaboración de este proyecto se desarrollaron las siguientes competencias:

- **Trabajo en equipo:**

Se estableció una colaboración entre ingenieros, especialistas y compañeros de área. Esta colaboración permitió integrar diversos puntos de vista para enriquecer el desarrollo del proyecto. Las reuniones constantes y las sesiones de análisis permitieron identificar necesidades específicas con las cuales cumplir con los requisitos del proyecto. La colaboración entre compañeros de área no solo optimizó el flujo de trabajo, sino que también ayudó a anticipar y resolver problemas, garantizando que el proyecto se completara a tiempo.

- **Comunicación efectiva:**

Se llevaron a cabo exposiciones acerca del desarrollo y los avances en el proyecto. Se aprendió a elaborar las presentaciones de manera que fueran fácilmente entendibles por todos los presentes sin importar su conocimiento del tema. Esto implicó el uso de planos, imágenes y ejemplos simples para explicar conceptos complejos. En las juntas, se adoptó un enfoque colaborativo y participativo, permitiendo una retroalimentación abierta y aprendiendo de la crítica. Todo esto facilitó la transmisión de ideas y proyectos, y además fortaleció las relaciones laborales.

- **Desarrollo del autoaprendizaje:**

Durante el desarrollo del proyecto se decidió utilizar un enfoque autodidacta para familiarizarse con términos técnicos y herramientas de diseño que eran desconocidos. Esto implicó la lectura de manuales, catálogos, búsqueda de



información en sitios web, así como la participación en cursos. También realizaron prácticas físicas para el entendimiento de los fenómenos estudiados aplicados en situaciones reales. Este enfoque no solo mejoró las habilidades personales, sino que también mejoró la eficiencia del equipo al integrar conocimientos nuevos y relevantes en el proyecto.

- Impulso en el aumento de la inteligencia espacial

Se promovió el desarrollo de esta inteligencia mediante el desarrollo de actividades y prácticas con las cuales se fortaleció la capacidad de visualizar imágenes mentales y plasmarlas en un medio. Esto incluyó la elaboración de simulaciones y modelos 3D para practicar la representación de conceptos e ideas abstractas. El entrenamiento en herramientas de software de diseño permitió convertir estas ideas en modelos digitales tangibles. Esta mejora en la inteligencia espacial permitió desarrollar de manera más precisa los diferentes modelos utilizados en el desarrollo del proyecto.



# FUENTES DE INFORMACIÓN

- Barta, C. (2023, 23 noviembre). Tipos de hornos industriales. CarboSystem. <https://carbosystem.com/tipos-de-hornos-industriales/>
- Dynamo\_Mx. (2023, 14 diciembre). ¿Qué son los hornos de fusión reverberatorios de aluminio alimentados por gas y cómo funcionan? Dynamo Furnaces. <https://dynamofurnaces.mx/2023/12/14/que-son-los-hornos-de-fusion-reverberatorios-de-aluminio-alimentados-por-gas-y-como-funcionan/>
- Hormesa. (2019, 21 noviembre). TILTING/FIXED ROTARY FURNACE -. <https://hormesa-mexico.com/tilting-fixed-rotary-furnace/>
- Svendsen, A. (2020, 17 agosto). ARTICLE: Digital Twin Methodology Improves Performance and Yield in an Aluminum Tilt Rotary Furnace - Light Metal Age Magazine. Light Metal Age Magazine. <https://www.lightmetalage.com/news/industry-news/recycling-remelt/article-digital-twin-methodology-improves-performance-and-yield-in-an-aluminum-tilt-rotary-furnace/>
- Chen, M. (2022, 7 abril). Tilting rotary furnace. <https://www.linkedin.com/pulse/tilting-rotary-furnace-meng-chen/>
- Tilt Rotary Furnace. (s. f.). Altek. <https://www.altek-al.com/products/altek-melting-solutions/tilt-rotary-furnace>



- COMPENDIO DE HORNOS DE FUNDICION PARA METALES NO FERROSOS. (s. f.).  
[https://enlinea.zacatecas.tecnm.mx/pluginfile.php/25714/mod\\_resource/content/8/GUIA%20DE%20PARA%20ELABORACION%20DEL%20COMPENDIO%20DE%20HORNOS.pdf](https://enlinea.zacatecas.tecnm.mx/pluginfile.php/25714/mod_resource/content/8/GUIA%20DE%20PARA%20ELABORACION%20DEL%20COMPENDIO%20DE%20HORNOS.pdf)
- Melting and Holding Furnaces for Die Casting. (2005). Die Casting Engineer.  
[http://www.moderneq.com/pdf/Melting\\_and\\_Holding\\_DCE.pdf](http://www.moderneq.com/pdf/Melting_and_Holding_DCE.pdf)
- REYMA Materiales Refractarios. (2024, 21 febrero). Introducción a los materiales refractarios. Reyma Reotix Materiales Refractarios.  
<https://www.reyma.com/introduccion-materiales-refractarios/#:~:text=En%20la%20pr%C3%A1ctica%2C%20un%20material,tienpo%20que%20resulte%20econ%C3%B3micamente%20rentable.>
- Control\_Web. (2024, 31 enero). Clasificación de materiales refractarios: Tipos y usos esenciales. Lamuño. <https://www.lamuno.com/clasificacion-de-materiales-refractarios-tipos-y-usos-esenciales/>
- Tipos de Transferencia de calor: Diferencias y Recomendaciones – NUTEC. (s. f.). NUTEC. <https://nutec.com/es/newsroom/articulos/tipos-de-transferencia-de-calor>
- Admin. (2022, 18 marzo). Conductividad térmica. Thermtest Latin America. <https://thermtest.com/latinamerica/que-es-la-conductividad-termica>
- INTRODUCCIÓN A SOLIDWORKS. (s. f.). SOLIDWORKS. [https://my.solidworks.com/solidworks/guide/SOLIDWORKS\\_Introduction\\_ES.pdf](https://my.solidworks.com/solidworks/guide/SOLIDWORKS_Introduction_ES.pdf)



- Vistas explosionadas en dibujos - 2018 - Ayuda de SOLIDWORKS. (s. f.).  
[https://help.solidworks.com/2018/spanish/SolidWorks/sldworks/t\\_Exploded Views in Drawings.htm](https://help.solidworks.com/2018/spanish/SolidWorks/sldworks/t_Exploded Views in Drawings.htm)
- The Schaefer Group, Inc. (s. f.).  
<https://www.theschaefergroup.com/about.php>
- ENDOSCOPIA y LA IMPORTANCIA DE LAS INSPECCIONES VISUALES EN LA VIDA ÚTIL DE LOS HORNOS. (s. f.). Saint-Gobain México.  
<https://www.saint-gobain.com.mx/endoscopia-y-la-importancia-de-las-inspecciones-visuales-en-la-vida-util-de-los-hornos>
- Nick. (2023, 12 diciembre). ¿QUÉ SON Y CÓMO FUNCIONAN LOS HORNOS DE FUSIÓN DE ALUMINIO DE REVERBERO DE GAS? - Hornos de dinamo. Hornos de Dinamo.  
<https://dynamofurnaces.com/es/2023/12/12/que-son-y-como-funcionan-los-hornos-de-fusion-de-aluminio-de-reverbero-a-gas/>
- Tratamiento térmico en hornos industriales - NUTEC Bickley. (s. f.). NUTEC.  
<https://nutecbickley.com/es/newsroom/articulos/tratamiento-termico-en-hornos-industriales>
- Asturmex. (2023, 5 octubre). Aislantes térmicos | ¿Qué son y para qué sirven? Asturmex..  
<https://puertasasturmex.com/blog/aislantes-termicos-que-son-y-para-que-sirven/>



# ANEXOS

**COPIA NO CONTROLADA**

**COMPONENTE MATERIAL**

| COMPONENTE               | MATERIAL               |
|--------------------------|------------------------|
| TECHO                    | 1 REFRACTARIO 5        |
|                          | 2 REFRACTARIO 1        |
|                          | 3 AISLANTE 1           |
| PARED SUPERIOR           | 4 AISLANTE 1           |
|                          | 5 AISLANTE 3           |
|                          | 6 REFRACTARIO 3        |
| PARED SUPERIOR L.        | 7 AISLANTE 1           |
|                          | 8 AISLANTE 3           |
|                          | 9 REFRACTARIO 3        |
| PARED INFERIOR CHARGE    | 10 AISLANTE 1          |
|                          | 11 AISLANTE 2          |
|                          | 12 REFRACTARIO 2       |
|                          | 13 REFRACTARIO 2 CENT. |
| PARED INFERIOR CHARGE L. | 14 AISLANTE 11         |
|                          | 15 AISLANTE 12         |
|                          | 16 AISLANTE 2          |
| PARED INFERIOR DIP       | 17 REFRACTARIO 2       |
|                          | 18 AISLANTE 1          |
|                          | 19 AISLANTE 2          |
| PARED INFERIOR DIP L.    | 20 REFRACTARIO 2       |
|                          | 21 AISLANTE 1          |
|                          | 22 AISLANTE 2          |
| PISO CHARGE              | 23 REFRACTARIO 2       |
|                          | 24 AISLANTE 1          |
|                          | 25 AISLANTE 2          |
| PISO DIP                 | 26 REFRACTARIO 4       |
|                          | 27 AISLANTE 1          |
|                          | 28 AISLANTE 2          |
|                          | 29 REFRACTARIO 4       |

**MATERIAL ##**

| MATERIAL                    | ## |
|-----------------------------|----|
| AISLANTE 1                  | 1  |
| AISLANTE 2                  | 2  |
| REFRACTARIO 1 (15% ALUMINA) | 3  |
| AISLANTE 3                  | 4  |
| REFRACTARIO 2 (70% ALUMINA) | 5  |
| REFRACTARIO 3 (60% ALUMINA) | 6  |
| REFRACTARIO 4 (65% ALUMINA) | 7  |
| REFRACTARIO 5 (50% SILICE)  | 8  |

**VERSIÓN PRELIMINAR**

IM de Rosendo S. de RL de CV  
Ingeniería de Servicios  
Toluca, México  
www.prelim.com.mx

HORNO TIPO TÚNEL REVERBERO CON BAHÍA DE RECIRCULACIÓN

Imagen 134 Plano de diseño.

*Imagen 134 Plano de diseño.*

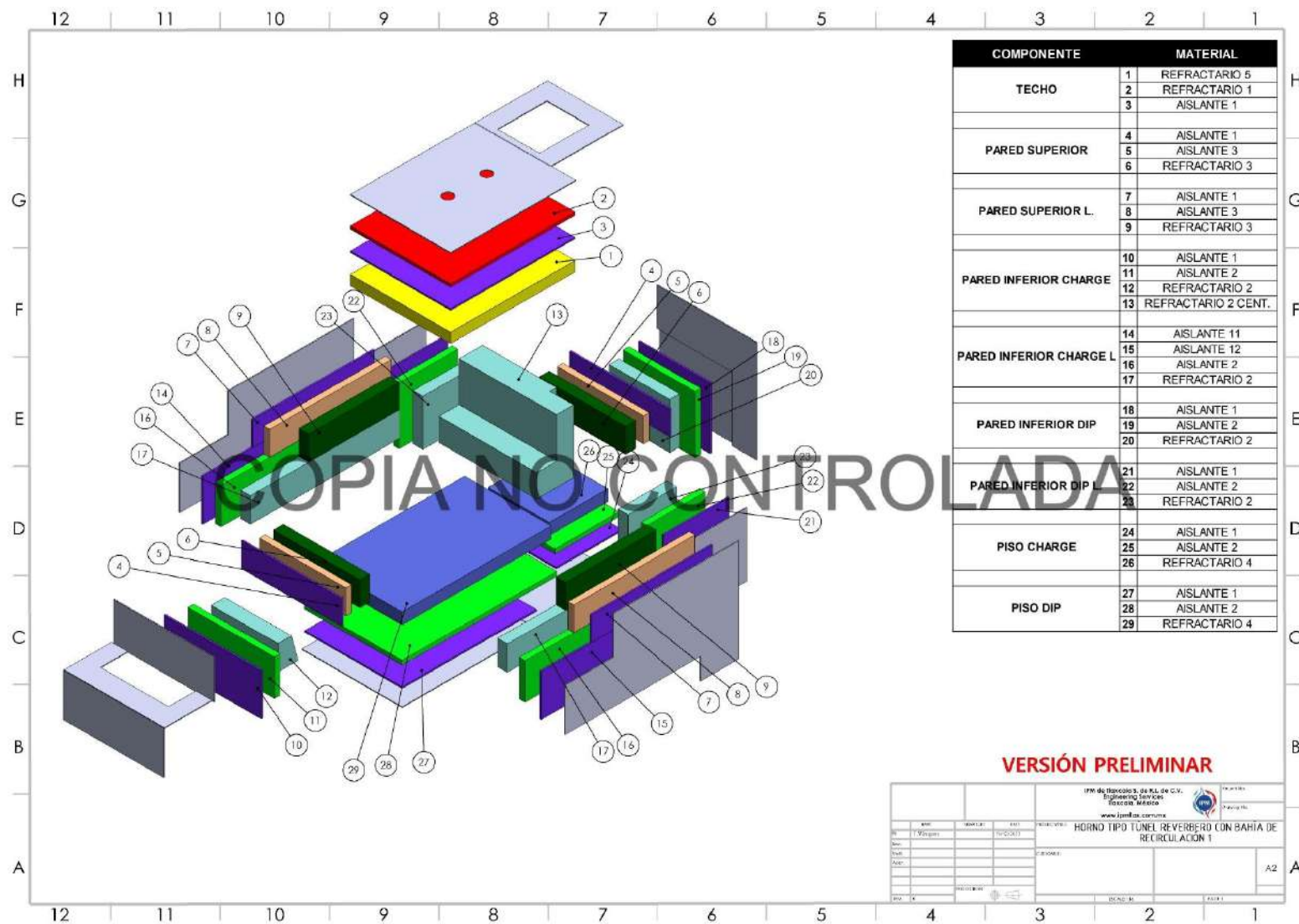


Imagen 135 Plano explosionado, propuesta 1.

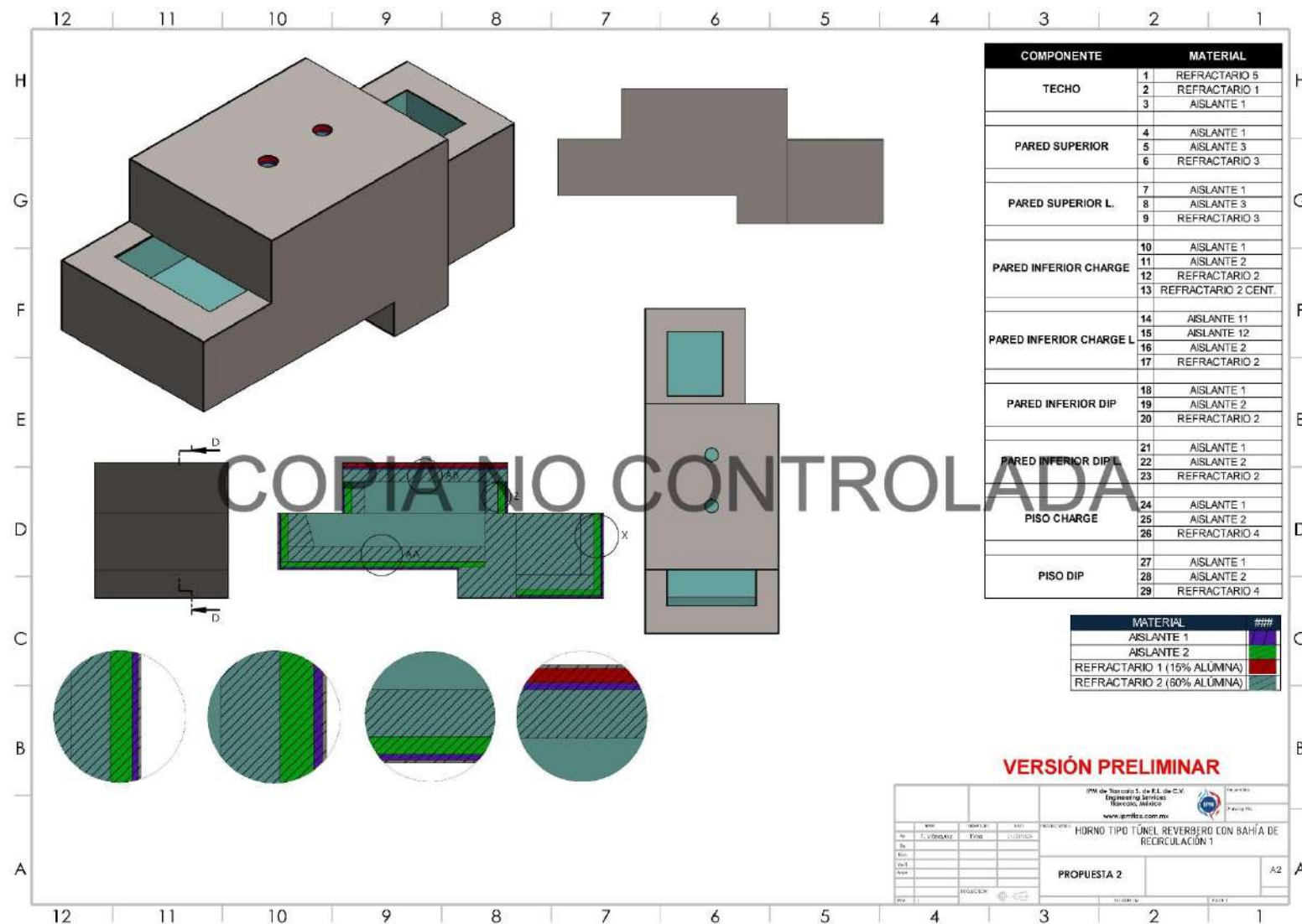


Imagen 136 Plano de diseño, propuesta 2.



Imagen 137 Plano de vista explosionada 2.

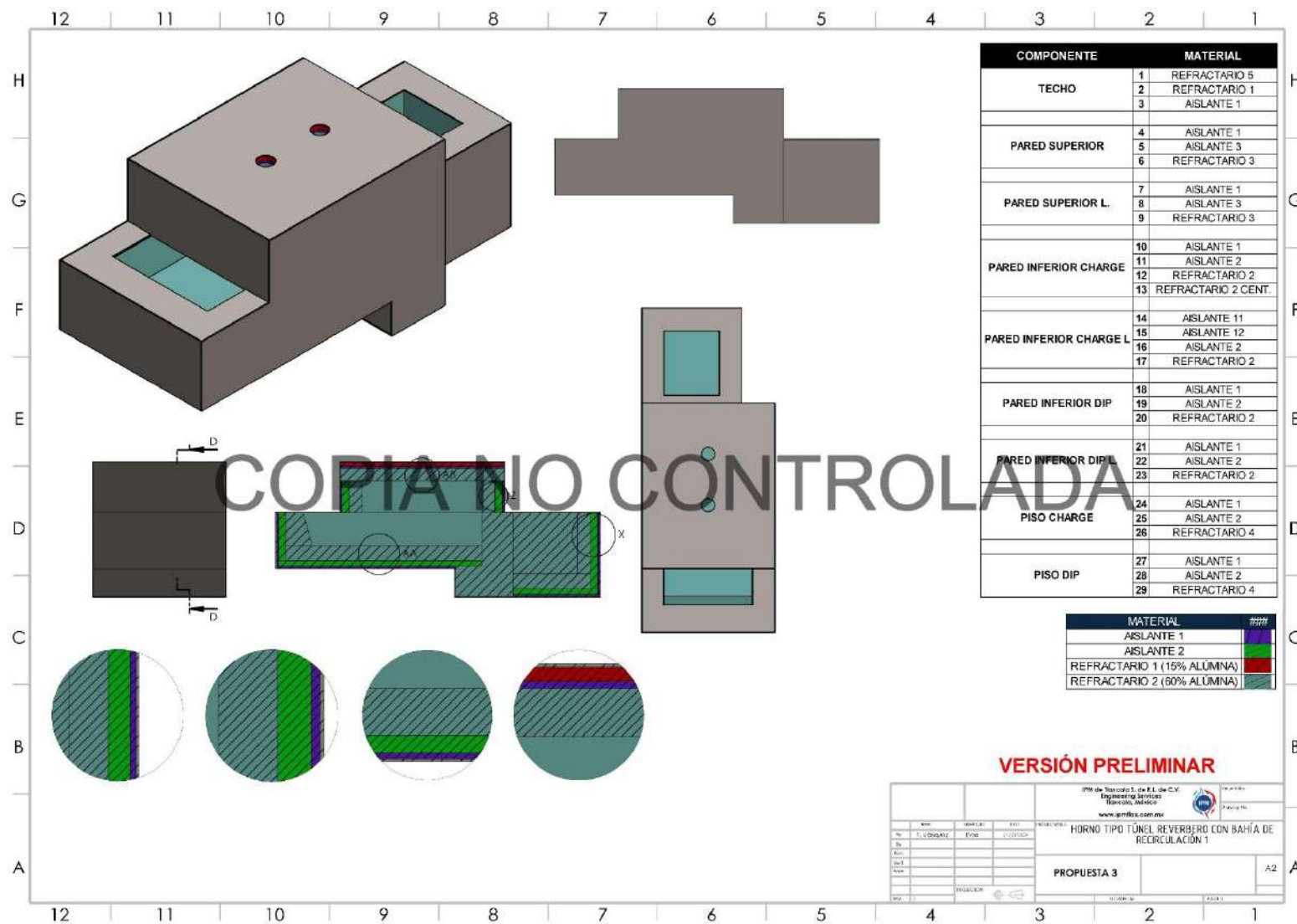


Imagen 138 Plano de diseño, propuesta 3.

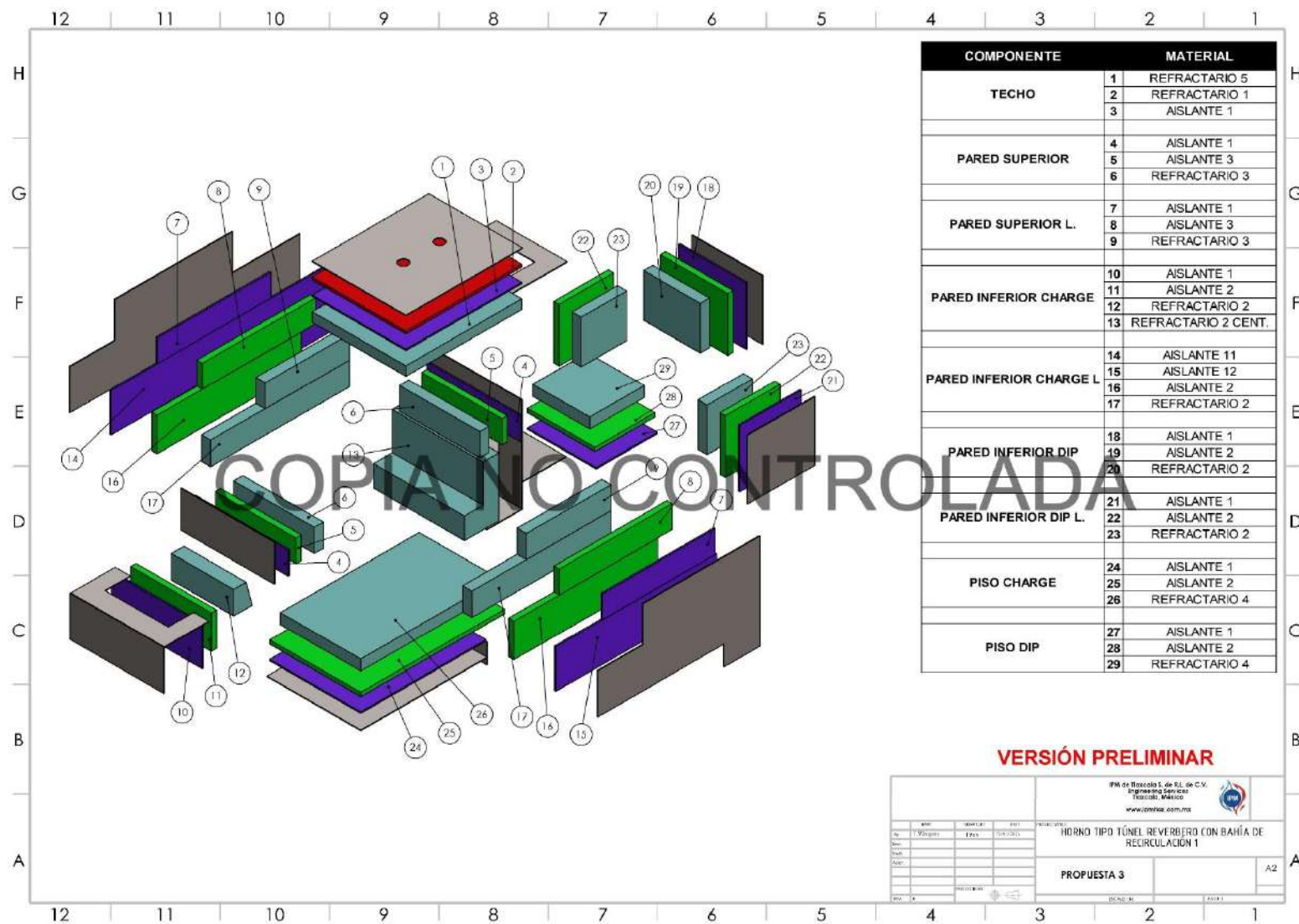


Imagen 139 Plano de vista explosionada 3.

## HORNO DE FUNDICION TIPO TÚNEL REVERBERO CON BAHÍA DE RECIRCULACIÓN 2



Imagen 140 Plano de diseño, propuesta 1.

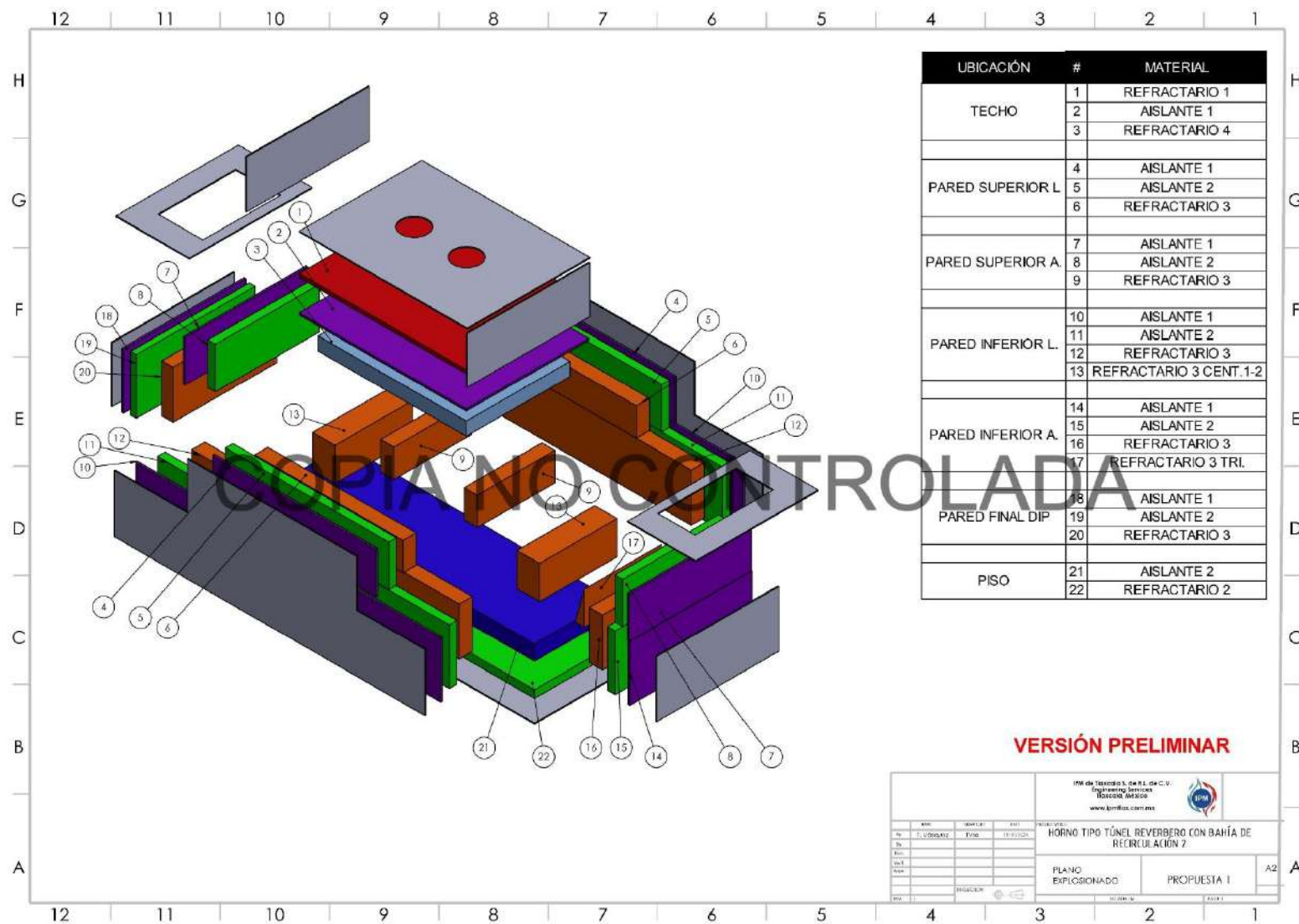


Imagen 141 Plano de vista explosionada 1.



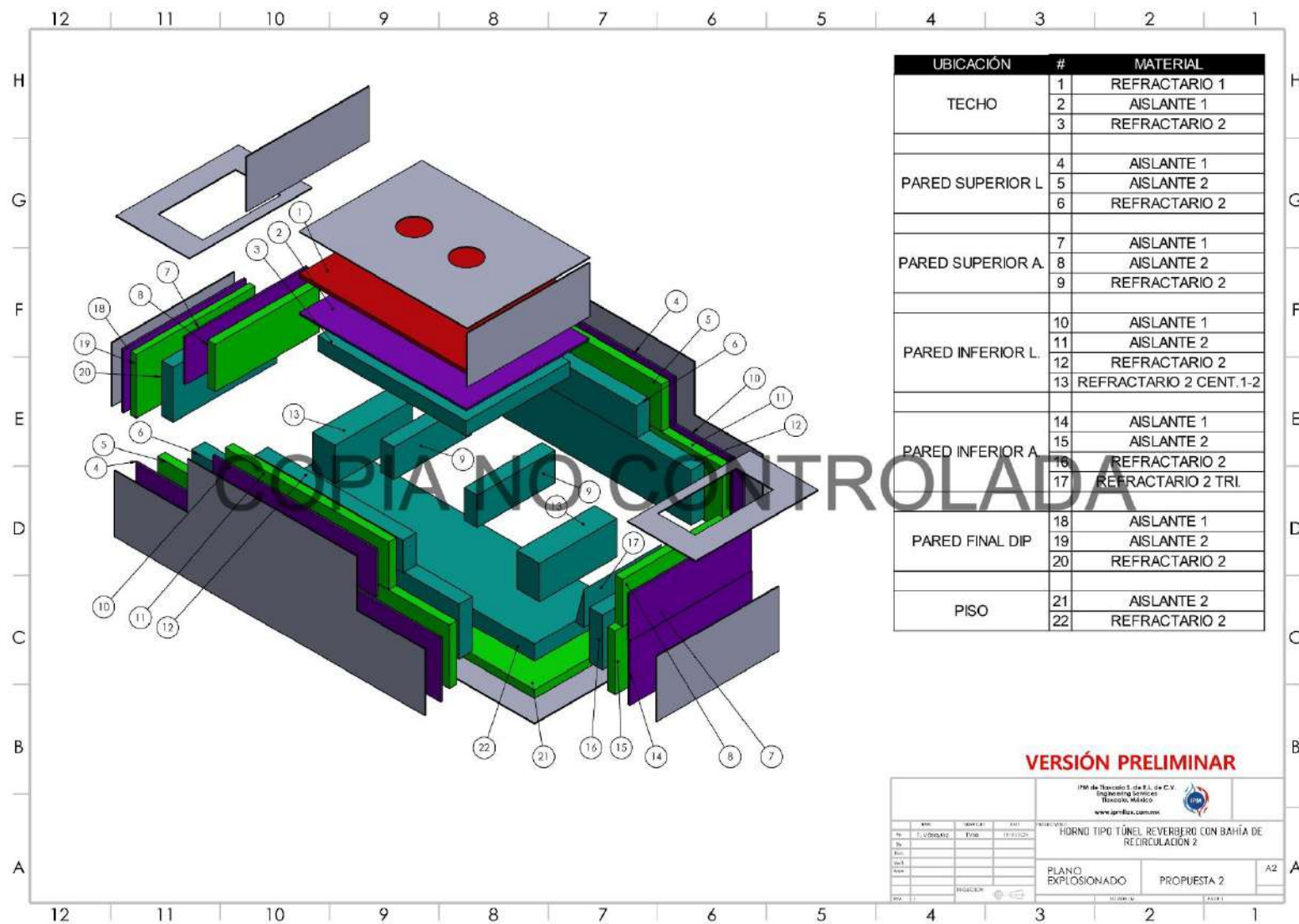


Imagen 143 Plano de vista explosionada 2.



Imagen 144 Plano de diseño, propuesta 3.

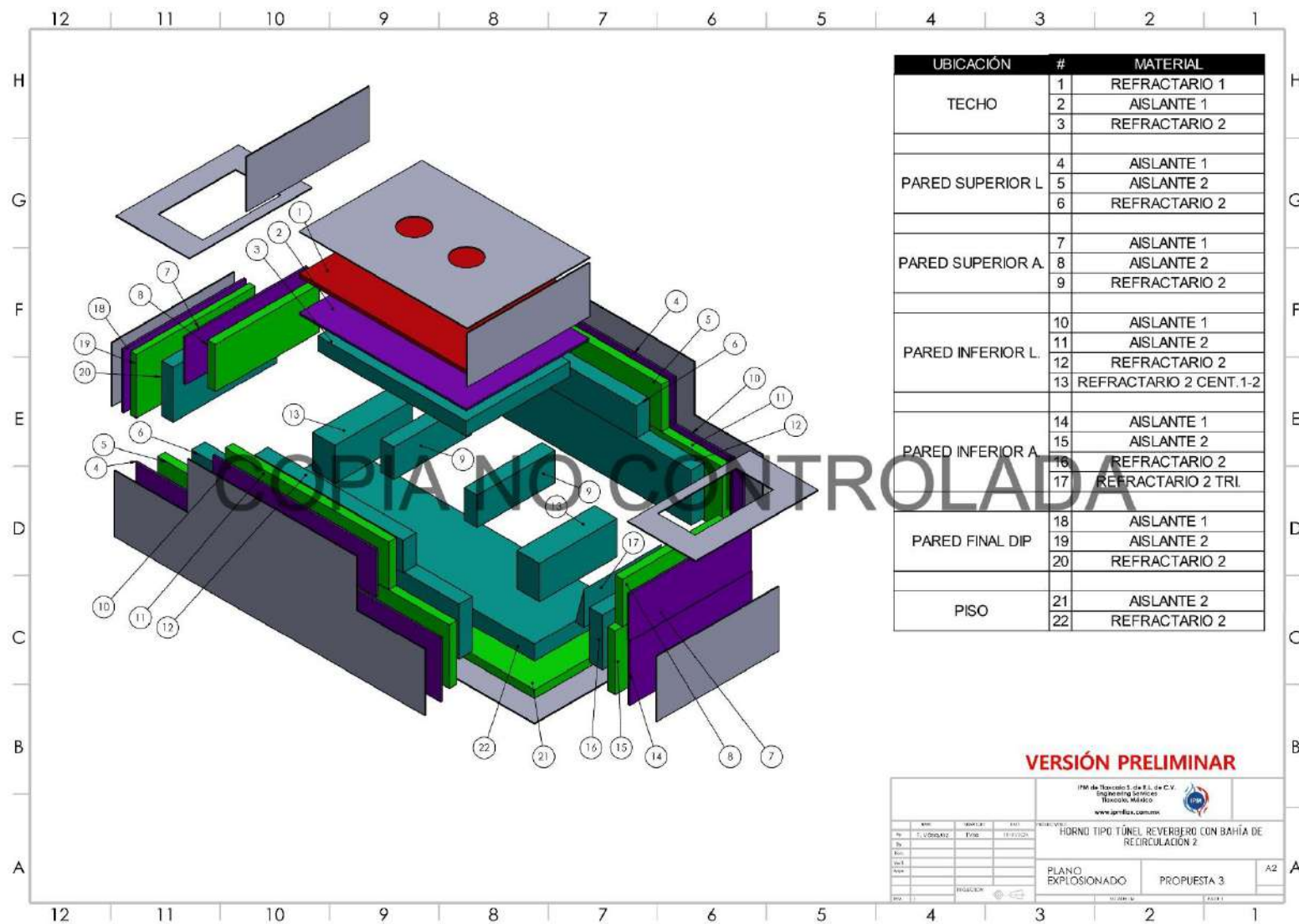


Imagen 145 Plano de vista explosionada 3.

## HORNO DE FUNDICION TIPO TÚNEL REVERBERO CON BAHÍA DE RECIRCULACIÓN 3



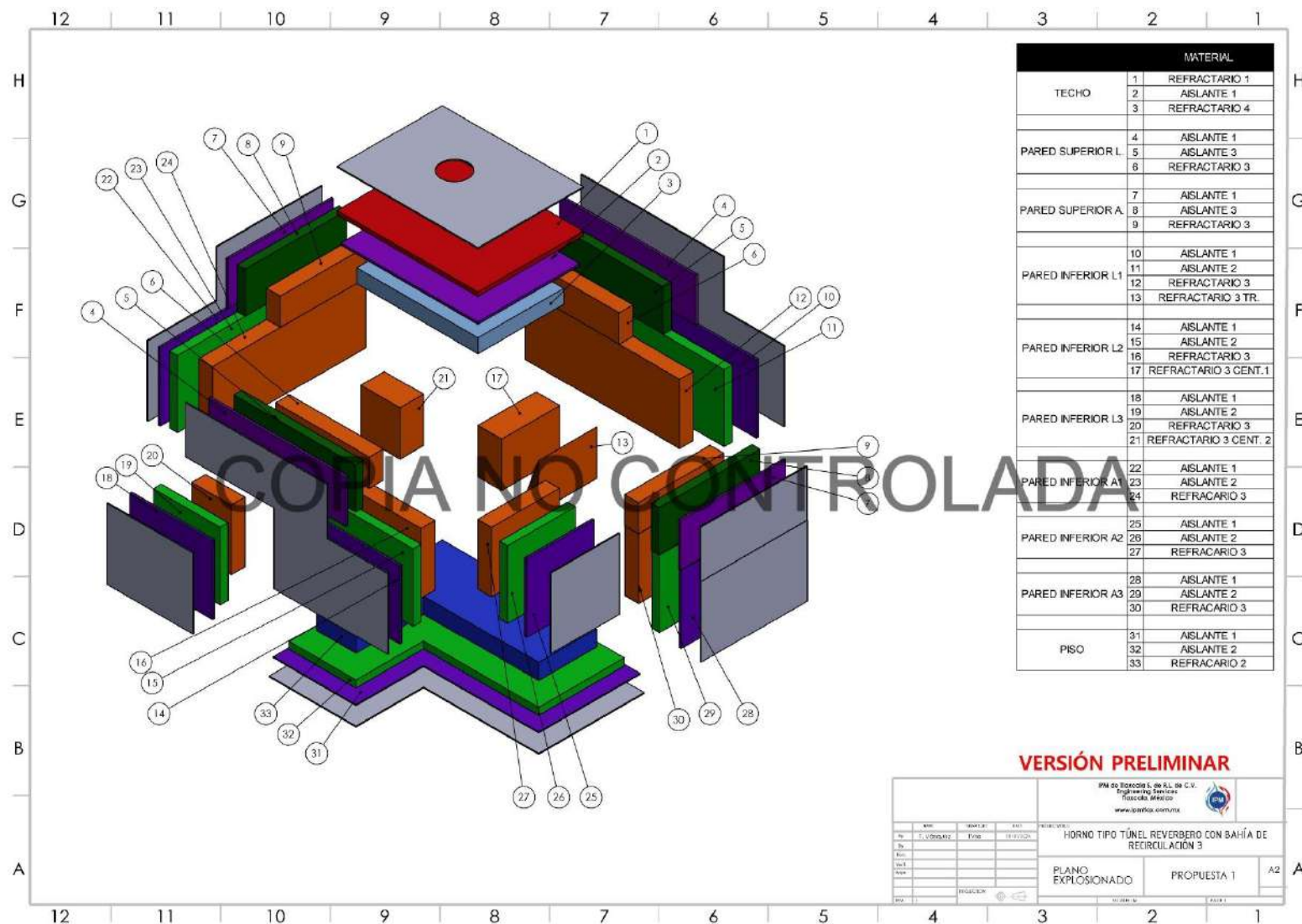


Imagen 147 Plano de vista explosionada 1.

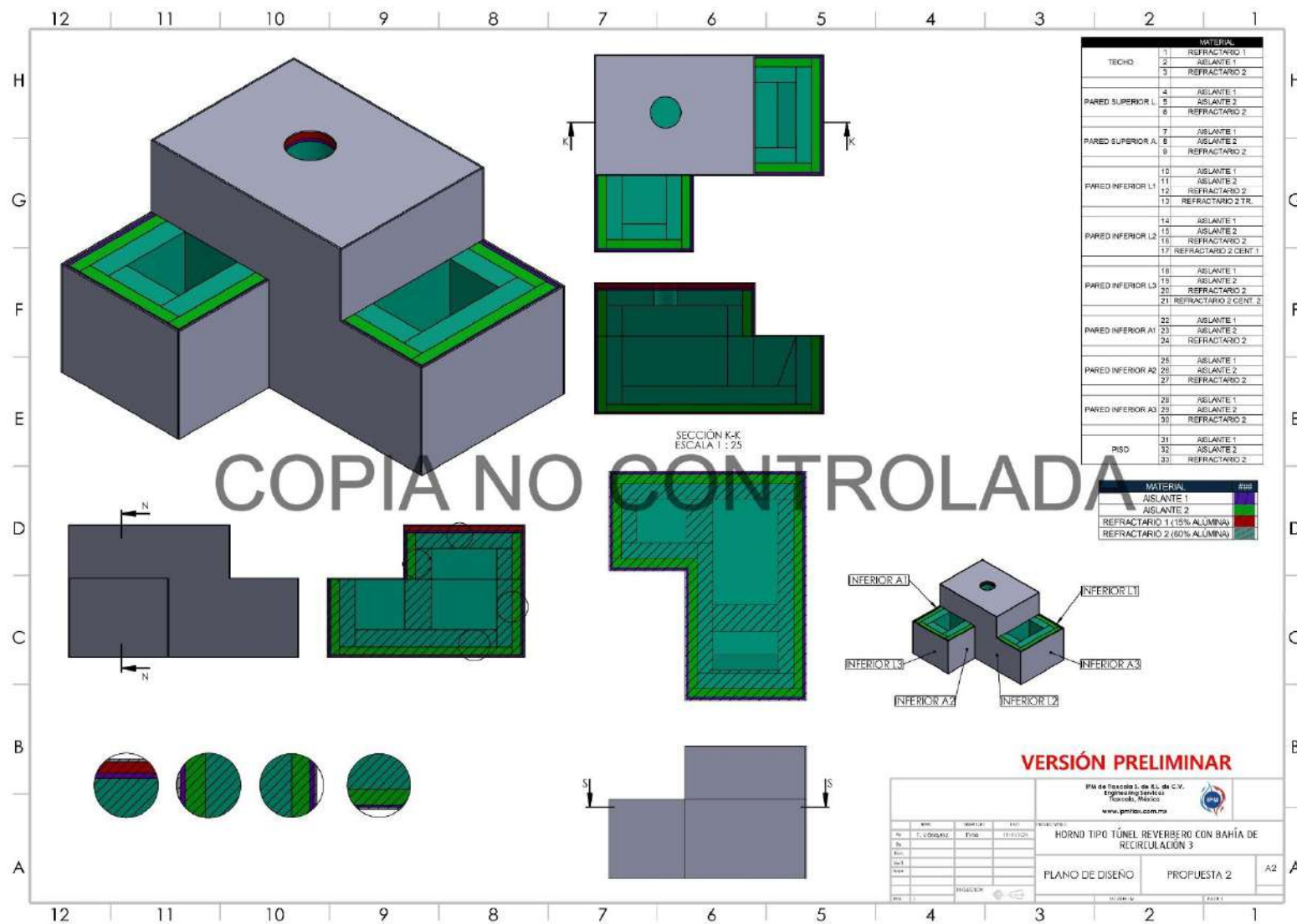


Imagen 148 Plano de diseño, propuesta 2.

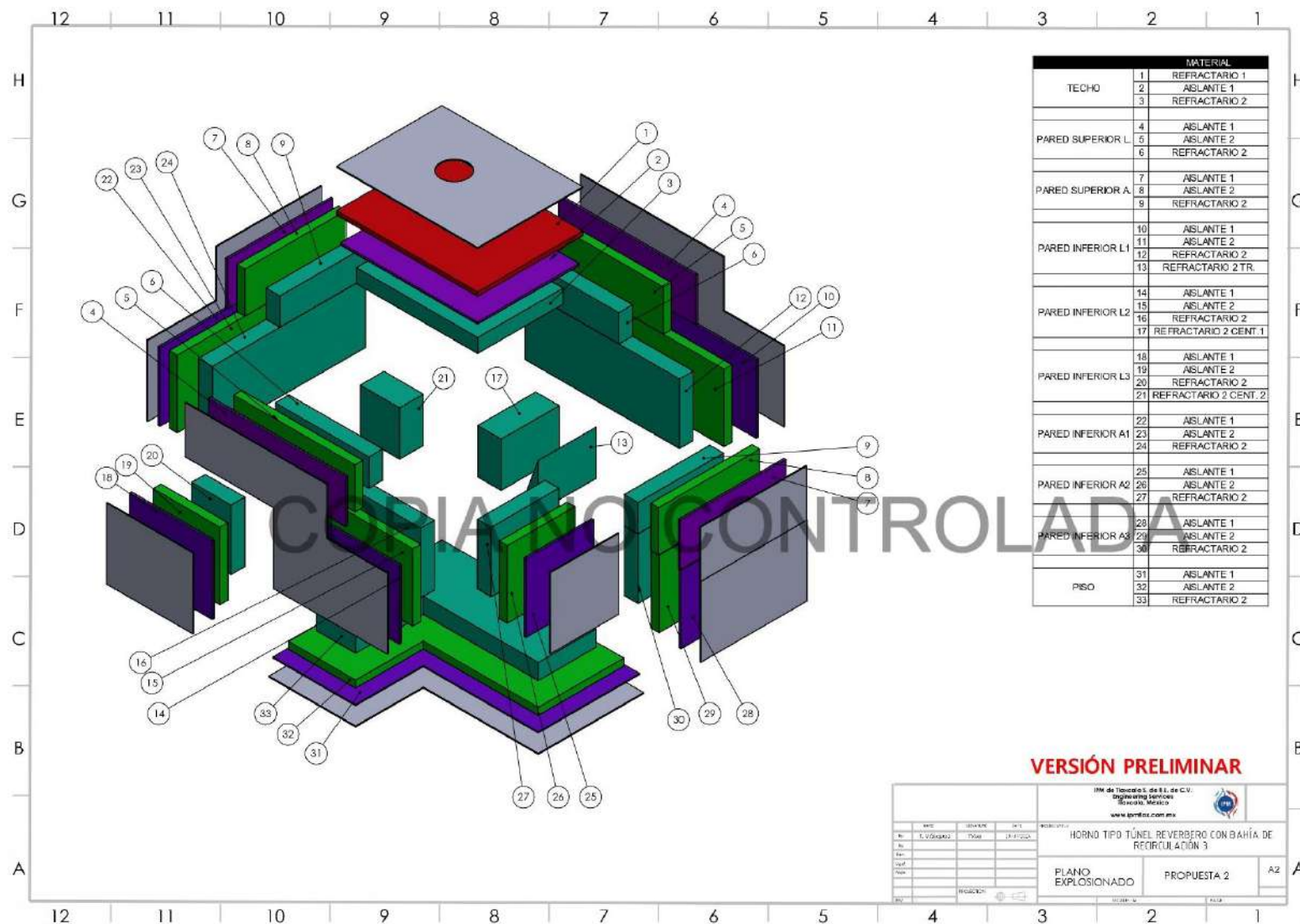


Imagen 149 Plano de vista explosionada 2.

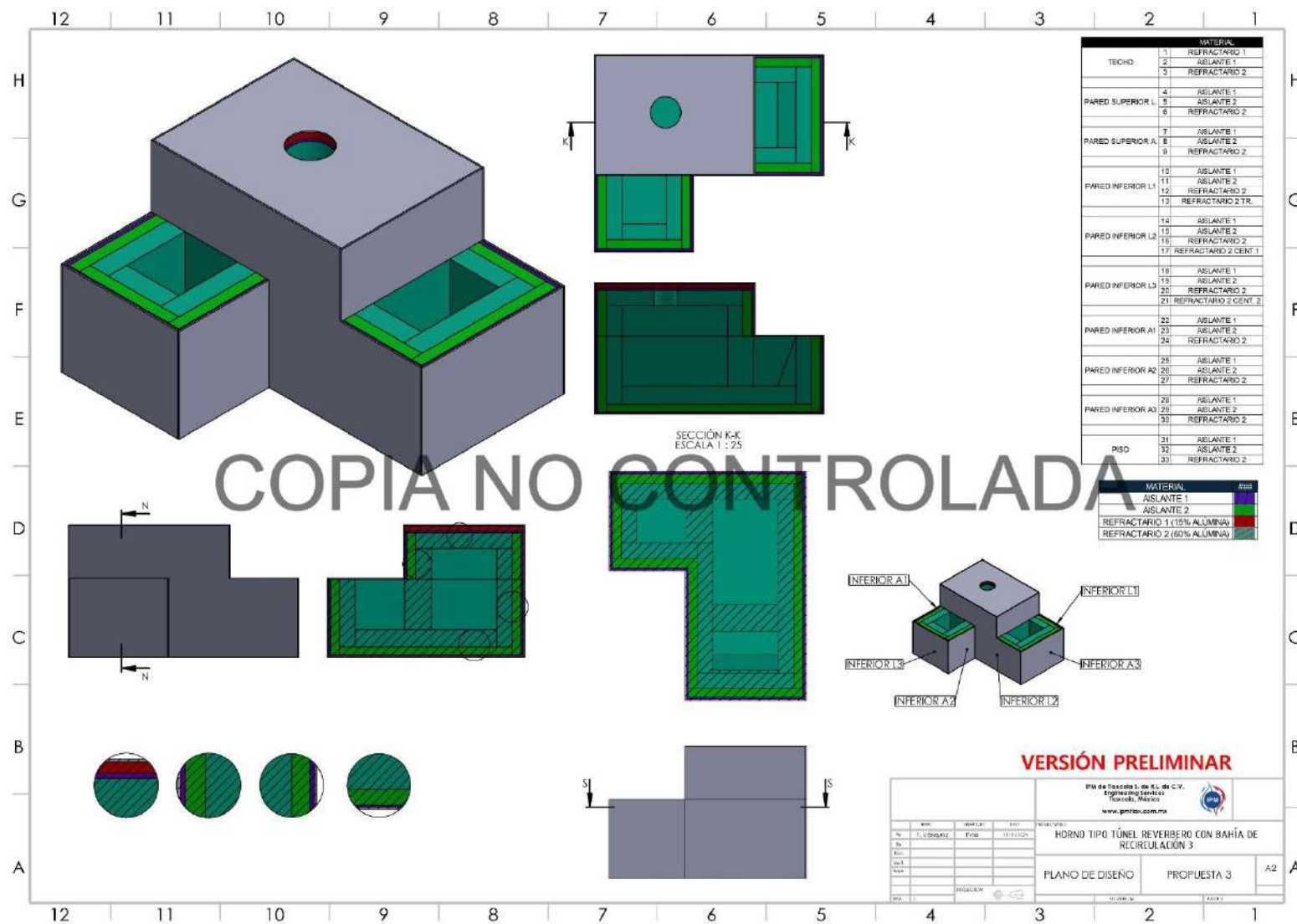


Imagen 150 Plano de diseño, propuesta 3.

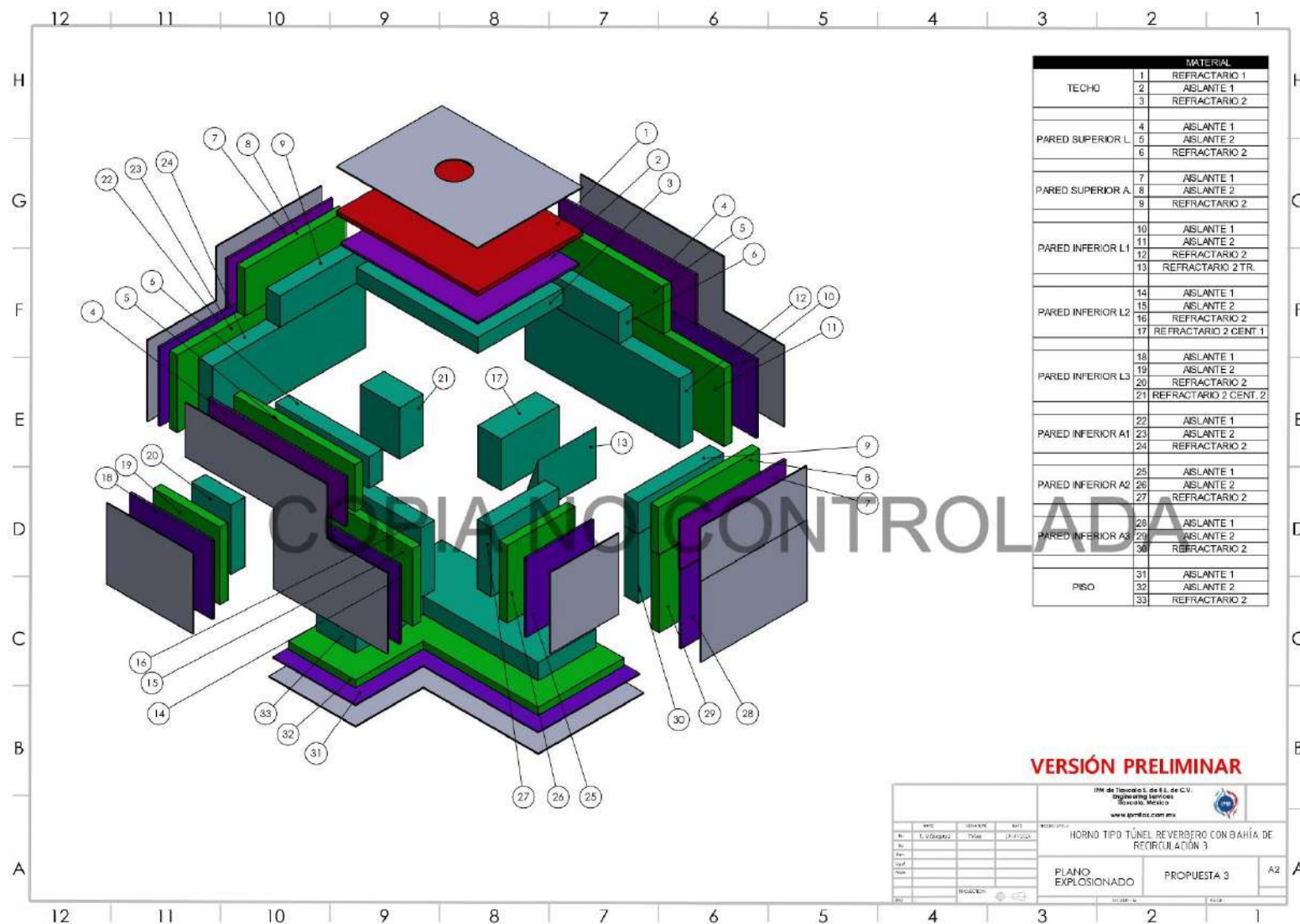


Imagen 151 Plano de vista explosionada 3.

## HORNO DE SECADO



Imagen 152 Plano de diseño.



## HORNO REVERBERO



Imagen 153 Plano de capacidad volumétrica.



Imagen 154 Plano de situación actual.



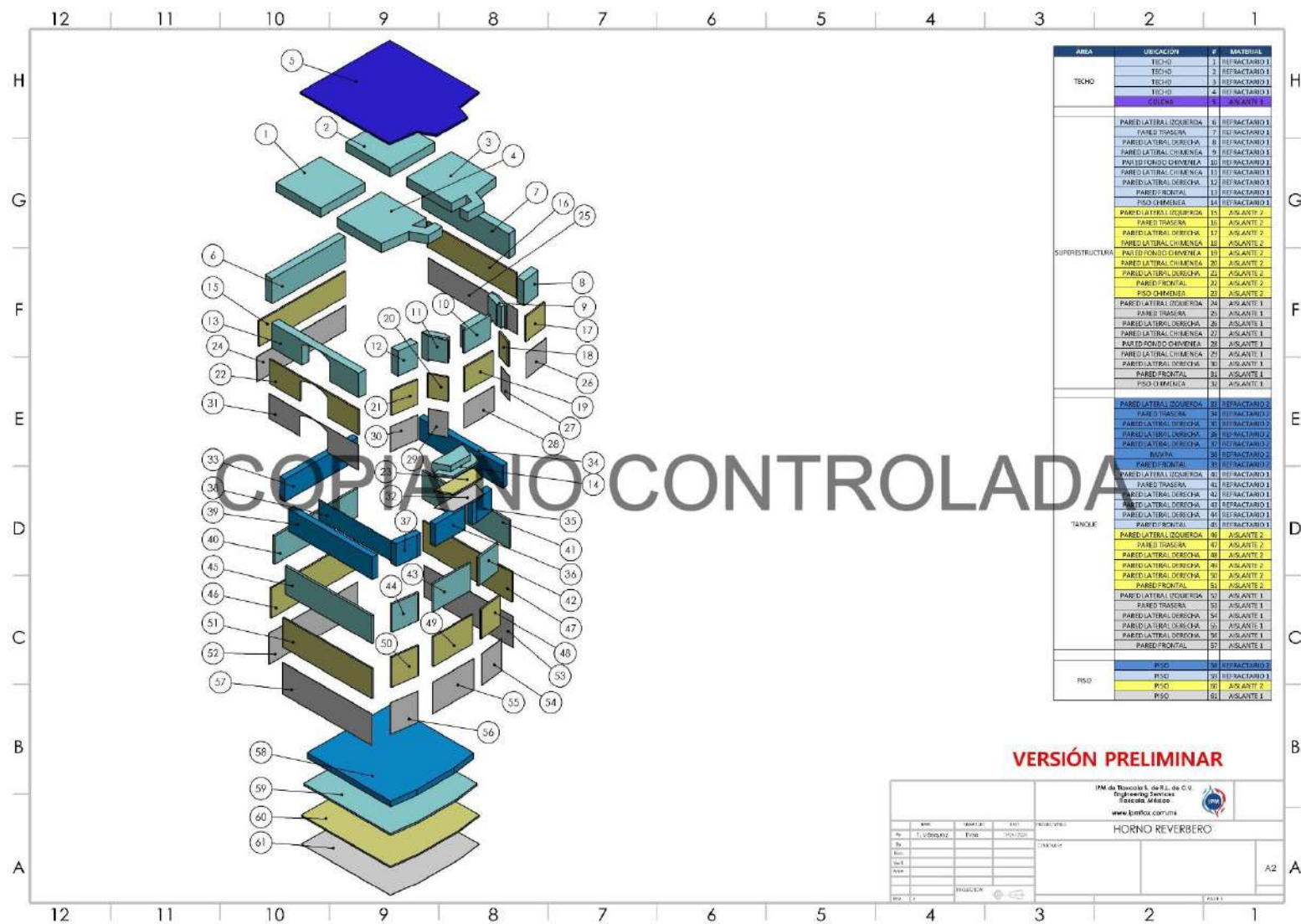


Imagen 156 Plano de vista explosionada 1.

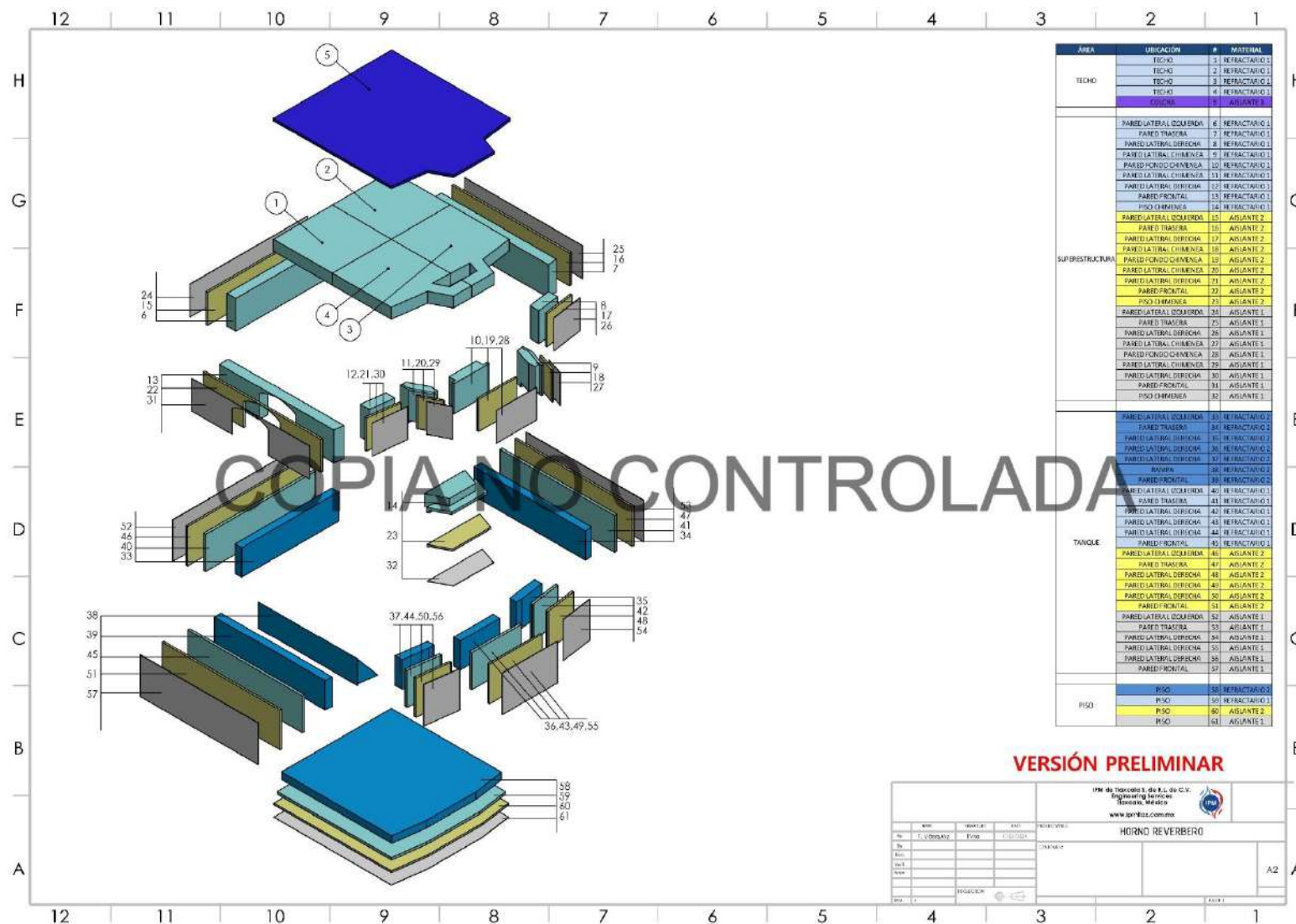


Imagen 157 Plano de vista explosionada 2.