

Diseño mecánico de un horno de fusión al arco eléctrico con atmósfera controlada para la fabricación de aleaciones metálicas

Mechanical design of an electric arc melting furnace with controlled atmosphere for metallic alloys production

Jaime Enrique Cervantes Fernández¹, Antonio Manuel Saltarín Jiménez², Mauricio Márquez Santos³, César Luis Barraza Botet⁴, Jimmy Unfried Silgado⁵

¹Ingeniero Mecánico, Universidad Autónoma del Caribe. Grupo IMTEF.

²Ingeniero Mecánico. Profesor Tiempo Completo. Universidad Autónoma del Caribe, Grupo IMTEF.

³MSc. Ingeniero Mecánico. Profesor Tiempo Completo, Universidad Autónoma del Caribe, Grupo IMTEF.

⁴MSc. Ingeniero Mecánico. Profesor Tiempo Completo, Universidad Autónoma del Caribe, Grupo GIIMA.

⁵PhD. Ingeniero Mecánico. Docente-investigador, Universidad Autónoma del Caribe, Grupo IMTEF. mmarquez@uac.edu.co

Recibido 16/07/13, Aceptado 21/10/2013

RESUMEN

El desarrollo de nuevas aleaciones es fundamental para las áreas de fabricación de implantes, instrumentación quirúrgica y materiales de alta resistencia a la corrosión y a la temperatura. La producción de estos materiales debe reunir calidad, confiabilidad, economía y sustentabilidad, garantizando limpieza y alta repetibilidad en su proceso, para ello es necesario equipos de fabricación que reúnan estas condiciones. Este trabajo describe el diseño mecánico de un horno de fusión al arco eléctrico con atmósfera controlada (HEV) para producir aleaciones metálicas con punto de fusión de hasta 3000°C. El diseño del HEV se fundamenta en referentes de la teoría del diseño mecánico y en simulación computacional, permitiendo el análisis geométrico, de funcionalidad y ergonomía de éste en operación. Como resultado se muestra y discute el diseño del HEV desde el punto de vista de los parámetros de ergonomía, accesibilidad, facilidad y economía de operación.

Palabras clave: Fabricación, Aleaciones metálicas, Horno, Fusión, Diseño mecánico.

ABSTRACT

Development of new metallic alloys is an essential topic for manufacturing of implants, surgical instrumentation, and corrosion and temperature high resistance materials. Production of these materials must meet the following conditions: quality, reliability, affordability, and sustainability, ensuring cleanliness and high repeatability in the process, therefore are necessary equipment that meet these criterions. This work describes the mechanical design of a melting furnace electric arc controlled atmosphere (HEV) with the aim to produce metallic alloys with melting point up to 3000 ° C. The HEV design is based on the theory concerning the mechanical design and computational simulation, allowing geometric analysis, functionality and ergonomics of its operation. The results shown and discussed the HEV design from the viewpoints of ergonomic parameters, accessibility, simplicity and economy of operation.

Keywords: Manufacturing, Metal alloys, Furnace, Fusion, Mechanical design.

1. INTRODUCCIÓN

Los hornos al arco eléctrico (Hornos Electro Voltaicos – HEV) son dispositivos utilizados para realizar fusión de materiales metálicos útiles para aplicaciones de ingeniería. Su diseño práctico, relativo bajo costo, menor consumo de energía [1], confiabilidad y repetibilidad los convierten en los hornos por fusión más usados para realizar inves-

tigación y desarrollos innovadores, permitiendo fabricar prototipos de nuevas aleaciones útiles para profundizar en su conocimiento; entre estos materiales se encuentran: aleaciones ferrosas inoxidable, así como aleaciones de Níquel y Titanio [2]. Los HEV poseen como ventajas comparativas frente a otros tipos de hornos las siguientes: (i) Regulación y control de la temperatura de fusión; lo que redunda en un mejor control de la calidad del baño fundi-

do y mayor rapidez de operación; (ii) evitan la mezcla de materiales combustibles con el baño fundido, impidiendo que lleguen impurezas indeseables, entre ellas gases moleculares y atómicos contaminantes difíciles de controlar; (iii) minimizan los residuos de combustión y de fusión durante la operación y (iv) aumentan considerablemente la repetibilidad de operaciones de fusión.

Generalmente, los hornos al arco eléctrico se dividen en tres partes fundamentales: la cámara, el crisol y el electrodo. En la cámara ocurre la operación de fusión debido a la acción del electrodo sobre el material a fundir, este último usualmente denominado en su conjunto como carga. En la cámara se alojan el crisol y el electrodo. La cámara puede contener diversos accesorios para el control de la operación, entre ellos termopares, entradas y salidas de gases y otros dispositivos electromecánicos y de obtención de datos. El crisol, el cual funciona como el contenedor de la carga, debe soportar las temperaturas de fusión sin contaminar el baño fundido por transferencia de elementos sea por fusión localizada o por difusión. Usualmente los crisoles se fabrican de materiales refractarios que soportan altas temperaturas, cuando no pueden ser refrigerados; o de materiales de alta conductividad térmica cuando la refrigeración es posible. Los electrodos son los responsables de suministrar la energía para la fusión y los más usados son de grafito y de aleaciones de tungsteno, este último como material termiónico no consumible.

La portabilidad de los HEV es una característica deseable en instalaciones como los laboratorios y centros de investigación. Esta característica es posible gracias al sacrificio de capacidad de carga y por ende de volumen de material producido. Los HEV podrían adaptar la capacidad de trabajar en atmósferas controladas estáticas para garantizar la homogeneidad microestructural, exigencia relevante en aleaciones usadas en industrias como electrónica, médica y quirúrgica, implantes y aeroespacial, donde la homogeneidad química, reducción de impurezas, junto con el control preciso de la composición resultan imprescindibles. Para estos hornos las cargas típicas de trabajo oscilan entre 0,5gr hasta 100gr máximo de material fundido. El intervalo de temperaturas de operación va hasta los 3000°C dependiendo del tipo de fuente de energía que usen. Usualmente la fuente de energía es similar a la usada para la operación de soldadura para el proceso al arco eléctrico con protección gaseosa y electrodo de tungsteno (GTAW).

Rara vez se encuentran datos en la literatura junto con una discusión abierta sobre el diseño de hornos al arco para fusión de metales en laboratorios [3,4]. En Colombia este tipo de hornos solo es posible adquirirlos a través de importación, pues no se producen comercialmente. Son usuales los HEV con cámaras transparentes que facilitan la observación durante la operación y electrodos de tungsteno para fundir la carga, la cual no sobrepasa los

20gr. Dada la importancia de incursionar en tecnologías que le den valor agregado a las aleaciones metálicas que se producen en el país y además que su uso complementaría el diseño a través de herramientas computacionales de nuevas aleaciones metálicas, es de suma importancia la búsqueda de alternativas tecnológicas que permitan este tipo de desarrollos [5]. Este trabajo tiene como objetivo describir los aspectos metodológicos y el diseño mecánico de un horno al arco voltaico con capacidad para una carga de 100gr que cumpla con parámetros razonables de ergonomía, accesibilidad, facilidad y economía de operación.

2. METODOLOGÍA DE DISEÑO

En la figura 1 se muestra en forma de diagrama de bloques secuenciales el flujo de actividades y requerimientos necesarios para el diseño del HEV. Las actividades inician con la recolección de información para la conformación del estado del arte; ambas permiten la construcción de los requerimientos de demanda del prototipo de horno, entre otros: funcionalidad, ergonomía, seguridad y economía. A partir de los requerimientos debidamente estructurados el sistema fue subdividido convenientemente en subsistemas, concebidos como unidades o componentes necesarios para el correcto funcionamiento del HEV. Una vez definidos los subsistemas se llevaron a cabo los diseños en detalle del equipo a través de un software tipo CAD, el cual incorporó el estudio de movimientos y el análisis de esfuerzos estáticos, factores que contribuyeron a la selección de materiales. La interacción entre la obtención de los planos y el proceso de fabricación, refina la obtención de los componentes del prototipo, lo que finalmente conduciría a la puesta a punto del equipo. Todos los pasos anteriores son documentados en informes escritos. A manera de resumen, los requerimientos más importantes para el desarrollo del HEV contemplados en este trabajo son: capacidad de carga 100gr, hasta 3000°C de punto de fusión, atmósfera controlada con presión estática entre 0,5 a 0,85 atm, refrigeración por agua a temperatura ambiente, vacío con bomba mecánica comercial y operación comfortable para personas entre 1,50 a 1,90 m de estatura. La subdivisión natural de componentes se hace en cámara, crisol, antorcha (electrodo) y soporte externo.

3. SUBSISTEMAS DEL PROTOTIPO

Los hornos de arco eléctrico son los más versátiles, no solo por proporcionar altas temperaturas sino porque además pueden controlarse eléctricamente con un alto grado de precisión [6]. Estos equipos poseen una gran cantidad de piezas y accesorios, por esta razón su estudio y diseño se dividió en cuatro sistemas fundamentales para permitir un análisis detallado de cada uno. En la figura 2 se representa los componentes del horno, el primero comprende la cámara del horno (lugar donde se realizará el proceso bajo una atmósfera controlada y elemento base del horno), el segundo sistema es la antorcha (elemento encargado de portar el electrodo

que permitirá realizar el arco eléctrico manipulado por el operador), el tercero hace referencia al crisol (lugar donde se mantendrá el material fundido durante el proceso) y finalmente el cuarto sistema es el soporte del horno (encargado de sostener todos los subsistemas del horno y el equipo mismo, así como todos los accesorios para realizar el proceso).

Figura 1. Esquema del modelo de metodología de desarrollo del diseño del HEV.

Figure 1. Flowchart of development design methodology for HEV furnace.

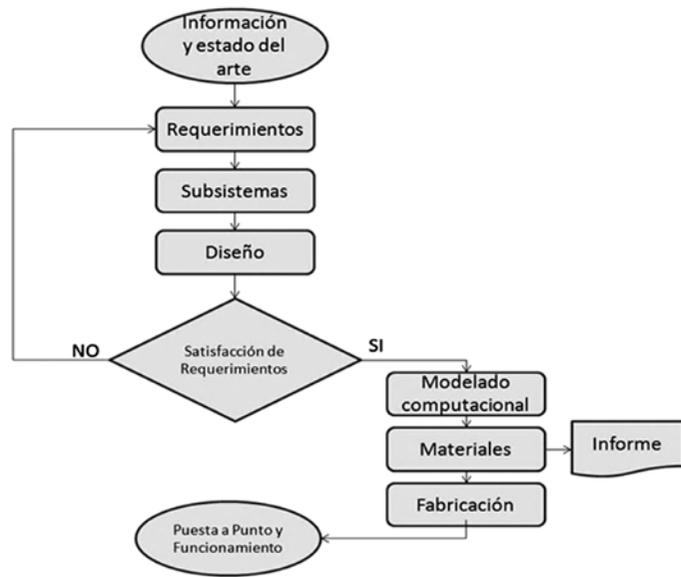
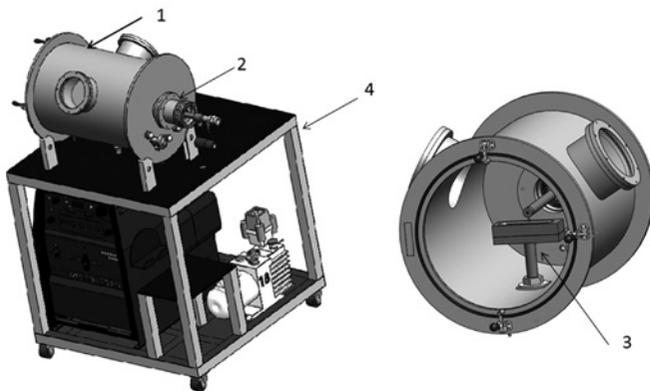


Figura 2. Sistemas fundamentales del HEV: 1) Cuerpo del horno, 2) Antorcha, 3) Crisol, 4) Soporte del horno

Figure 2. Main furnace HEV components: 1) Furnace body, 2) Torch, 3) Crucible, 4) Supporting of furnace



3.1. Cuerpo del horno

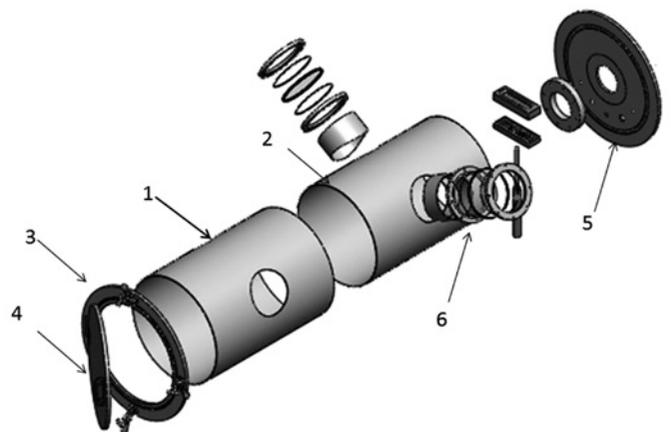
Formado básicamente por la cámara del horno donde se realizará el proceso de fusión. Este elemento estará sometido a todo el esfuerzo debido a la presión producto de la extracción del aire en la cámara, con el fin de evitar la

contaminación de la muestra y garantizar un grado de pureza óptimo. En el enfoque de este trabajo solo interesa la presión de vacío para remover los constituyentes de la atmósfera que pudieran causar una reacción física o química en el material de trabajo, como puede ser la oxidación, durante el proceso de fusión de metales reactivos como el titanio [7]. Además de la presión negativa dentro de la cámara, producto del vacío, ésta se verá sometida a fluctuaciones térmicas generadas por la exposición al calor. Este calor se transfiere por la radiación emitida mediante el arco eléctrico y la propia del metal fundido, además del calor transferido por convección que se propaga a través del fluido que genera la atmósfera interna del horno.

Para contrarrestar los posibles fenómenos que se puedan presentar debido a la transferencia de calor en las paredes del horno, la cámara contará con un sistema independiente de refrigeración. Este sistema trabajará bajo el principio de convección forzada causada por el líquido refrigerante (agua), que fluirá a cierta velocidad por la zona exterior de las paredes internas del horno. Para ello se diseñarán chaquetas de refrigeración para tanques. El horno puede ser catalogado como un recipiente sometido a presión, lo que significa un recipiente que contiene un fluido el cual tiene una diferencia de presión en su interior con respecto al exterior. En el caso del horno, la presión será menor a la atmosférica por lo cual se evaluará como tanque sometido a presión externa, o de vacío, sin sacrificar los cálculos de presión interna que pueden ocurrir en una situación no deseada [8]. Los componentes que conforman el cuerpo del horno son: Cámara interna, chaqueta de refrigeración, flanche delantero, tapa frontal, tapa posterior, visores y accesorios se muestran en la figura 3 y se describen en la tabla 1.

Figura 3. Componentes del cuerpo del Horno. Las partes presentes son: 1) Cámara interna, 2) Chaqueta de refrigeración, 3) Flanche delantero, 4) Tapa frontal, 5) Tapa posterior, 6) Visor.

Figure 3. Furnace body components show the following parts: 1) Inner chamber, 2) cooling jacket, 3) front flange, 4) front cover, 5) Rear Cover, 6) Viewer.



En la tabla 1 se realiza una descripción de los componentes del cuerpo del horno.

Tabla 1. Descripción componentes del cuerpo del Horno
Table 1. Description Furnace body components

No.	Componente	Observaciones
1	Cámara interna	Constituye el chasis del horno.
2	Chaqueta de refrigeración	Contiene el líquido para mantener refrigerada la cámara interna, los visores y algunas áreas del flanche delantero.
3	Flanche Delantero	Junto a la tapa delantera sellan la cámara. Otra función es servir de apoyo, junto con la tapa posterior, para realizar la agitación mecánica de la aleación.
4	Tapa delantera	Permite entrada y salida a la cámara del horno de muestras, facilita mantenimiento y montaje interno de los componentes.
5	Tapa posterior	Mantiene sellada la cámara del horno, además posee la función de servir como apoyo para realizar el mezclado mecánico de la aleación en estado líquido. Lugar donde se realizan las conexiones con el exterior (extracción e ingreso de refrigerante como la introducción de la antorcha).
6	Visores	Ventanillas de observación o view-ports, permiten la visualización dentro del horno.

3.2. Antorcha

Es el mecanismo del horno que tiene como función principal manipular el electrodo por medio del cual se generará el arco eléctrico para realizar la fusión del material y permitir el control del metal líquido durante la operación. Ésta será manipulada manualmente por el operario por lo cual se requiere adquirir de éste cierta destreza. Por esta razón se debe tener en cuenta parámetros de ergonomía, debido a que además de ser funcional debe ser cómoda al operario, pues la fatiga al tener el brazo en un ángulo de casi 90° con respecto al torso puede afectar la precisión para mantener la distancia necesaria para mantener el arco eléctrico y evitar el contacto entre el electrodo y el material de proceso. La antorcha también posee su sistema de refrigeración, que si bien ambos dependen de la misma torre de enfriamiento, son independientes entre sí. El núcleo de la antorcha es un tubo de cobre en cuyo interior se encuentra el sistema de refrigeración. La figura 4 detalla esquemáticamente este elemento. En la tabla 2 se presenta la descripción de cada uno de los componentes que conforman la antorcha.

Figura 4. Componentes de la antorcha. Las partes presentes son: 1) Núcleo de la antorcha, 2) Sistema de movimiento angular, 3) Sistema de movimiento axial
Figure 4. Torch components. The parts are: 1) Core of torch, 2) angular movement system, 3) axial movement system.

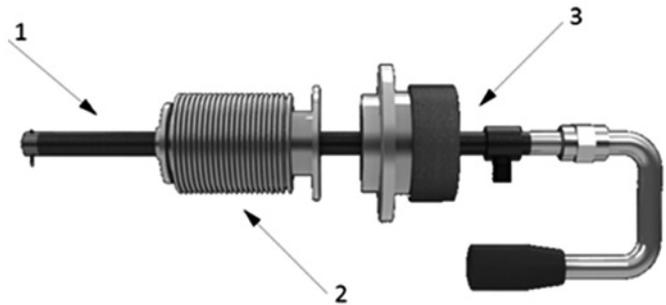


Tabla 2. Descripción de los componentes de la antorcha
Table 2. Description of torch components

No.	Componente	Observaciones
1	Núcleo de la antorcha	Encargada de transportar la corriente eléctrica desde la fuente y de portar el electrodo.
2	Sistema del Movimiento Angular de la Antorcha	Necesario para manipular el electrodo en el espacio, conservando la atmósfera interna a través de fuelles.
3	Sistema de Movimiento Axial	Permite la penetración del electrodo en el horno de manera sencilla pero precisa.

3.3. Crisol

El crisol es la parte del horno donde se lleva a cabo la fusión de la carga además de cerrar el circuito del electrodo. Debido a esto, el crisol deberá fabricarse de un material que tenga excelentes propiedades eléctricas y térmicas, que esté muy bien refrigerado y con un punto de fusión relativamente alto. Como el crisol estará dentro de la cámara del horno, debe asegurarse que esté aislado eléctricamente de ésta, a su vez que conserve la hermeticidad de la cámara. El diseño del crisol comprende básicamente 7 piezas, fuera de pernos, sellos y conexiones necesarios para su ensamble y funcionamiento. La figura 5 presenta los elementos que forman el sistema del crisol. La tabla 3 presenta las características de los componentes que hacen parte del crisol.

Figura 5. Componentes del crisol. Las partes presentes son: 1) Tapa superior del crisol, 2) Tapa inferior del crisol, 3) Tubería para la entrada de agua, 4) Tubo base, 5) Pieza aislante, 6) Superficie para O-ring, 7) Tubo acople crisol-cámara.

Figure 5. Crucible components. The parts present are: 1) Top cover, 2) bottom cover, 3) water inlet, 4) tube base 5) insulator, 6) O-ring, 7) camera and crucible coupling

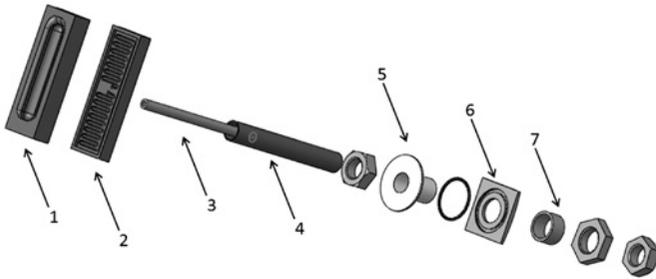


Tabla 3. Descripción del sistema del crisol.

Table 3. Crucible system description

No.	Componente	Observaciones
1	Tapa Superior del Crisol.	Sirve como cavidad contenedora del material fundido proporcionando el arco eléctrico. En la cara opuesta posee una rebaja para permitir el acople mediante soldadura fuerte (Brazing) con la tapa inferior. El crisol está hecho totalmente de cobre OFCH.
2	Tapa Inferior del crisol.	Posee un sistema de pequeños canales para facilitar el paso del fluido refrigerante. Fabricado de cobre OFCH.
3	Tubería para la Entrada de Agua	Fabricado de la misma tubería delgada de acero inoxidable de la antorcha.
4	Tubo Base	Sostiene el crisol dentro del horno. También es el encargado de permitir la salida del fluido refrigerante del crisol y es quien conecta la entrada de corriente y agua. Fabricado de un tubo de cobre comercial.
5	Pieza Aislante	Crea aislamiento eléctrico entre el crisol y la cámara del horno.
6	Superficie para O-Ring	Tiene como función ofrecer una superficie plana para colocar un sello que será deformado por la pieza aislante.
7	Tubo de Acople Crisol-Cámara	Pequeño tubo de acero inoxidable soldado a la chaqueta del horno por el agujero de la parte inferior central. Sirve como guía para posicionar el crisol en la cámara.

3.4. Soporte del horno

Es la estructura donde descansará el horno y los demás equipos que servirán como subsistemas, está fabricado en su

mayoría por perfiles cuadrados de acero estructural (ASTM A36). El diseño que se propone es práctico pues permite organizar logísticamente todos los componentes del horno, además ofrece ventajas como: bajo peso, elevada resistencia, admisión de reforma in situ ante nuevas circunstancias con poco traumatismo, etc. [9]. El soporte cuenta con tres niveles; en el primero se ubicará la fuente de soldadura y la bomba de vacío, en el segundo una pequeña repisa lugar de la torre que realizará lo relacionado al control electrónico del equipo y en el tercer nivel es donde se posicionará el horno. En este último nivel se encontrarán los soportes con rodamientos donde se apoyará el horno y permitirá crear el movimiento que generará la homogenización mecánica del material fundido. La mesa del horno también tiene como función portar todos los accesorios necesarios para el funcionamiento del horno como las válvulas para el control de los fluidos (tanto refrigerantes como gases), también los elementos de control como los sensores de temperatura y presión. Las superficies de los niveles de la mesa estarán cubiertas por una superficie de un polímero, elastómero, que protegerá de la corrosión y además servirá como mecanismo de seguridad para aminorar riesgos por accidentes eléctricos.

3.5 Subsistemas del HEV

Los subsistemas son parte fundamental del funcionamiento y la operación del equipo ya que brindan las condiciones necesarias para que se haga posible la operación del equipo. Entre los subsistemas tenemos la fuente de energía que permite realizar el arco eléctrico (máquina de soldar procesos TIG), el cilindro de argón y la bomba de vacío que juntos permiten la atmósfera controlada y dan la calidad requerida al medio del proceso; así mismo está la torre de enfriamiento que permite mantener las condiciones de los fluidos refrigerantes del horno y la torreta de control que permite la manipulación electrónica del equipo.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dentro de las consideraciones de diseño geométrico de la cámara interna influyeron factores como la radiación, el espacio para realización de la operación, la transferencia de calor hacia los componentes internos del horno (que están en función de la distancia que existe entre estos y el arco eléctrico) y la homogenización de la mezcla de materiales fundidos durante la fusión. Estos factores incidieron en la decisión de la geometría seleccionada de la cámara debido al aprovechamiento de los extremos circulares (que permitiría realizar la agitación mecánica); además, esta forma garantiza una mejor distribución de esfuerzos generados por la diferencia de presión.

Teniendo en cuenta los anteriores parámetros se evaluaron las necesidades del prototipo del horno. La principal propiedad mecánica a tener en cuenta es la resistencia

del material a esfuerzos de tensión (la condición de vacío influye en la variación de la dirección de la deformación en comparación a los tanques sometidos a presión interna). En el caso del HEV las presiones que se manejarán en el equipo son relativamente bajas en comparación a las grandes presiones que manejan los grandes tanques industriales que soporten altísimas presiones de fluidos contenidos. Evaluando los posibles materiales a utilizar y teniendo en cuenta consideraciones como: aceptable resistencia a la elongación, bajo punto de dilatación térmica, buenas propiedades contra la corrosión, soldable con facilidad, económicamente asequible, se seleccionó como material de construcción al acero inoxidable A304. El proceso de unión recomendado, para este tipo de estructuras es la soldadura, debido a que ofrece como principal ventaja garantía de estanqueidad permanente [10].

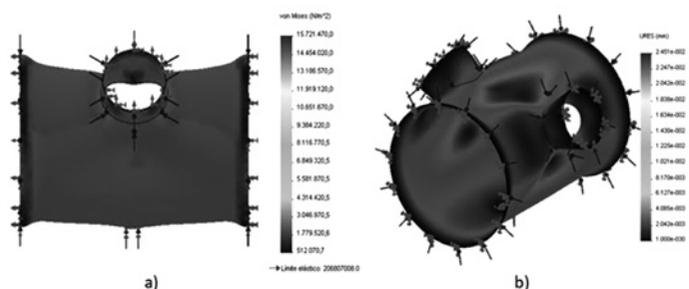
4.1. Análisis por mecánica computacional

Las simulaciones fueron realizadas por un software comercial empleando la teoría de la energía máxima o Von Mises, la cual representa los esfuerzos y desplazamientos estáticos en los elementos analizados del horno HEV. Gracias a esta herramienta se pudo determinar el factor de seguridad de resistencia a la deformación dependiendo del material, los apoyos, las magnitudes, direcciones y sentidos de las cargas y por supuesto de la geometría de la pieza.

En el caso del horno HEV, para la cámara interna, se evaluaron las piezas sometidas directamente a esfuerzos de compresión ejercidos por la presión atmosférica al realizar vacío durante el proceso. Estas piezas sometidas son la cámara interna, quien tiene mayor afección debido a su área superficial mayor y las tapas, tanto delantera como trasera. La cámara interna se tiene en cuenta como un mismo cuerpo junto con los visores, quienes también son afectados por la presión. La mesa y la bisagra son evaluadas por cargas debido al peso del horno y la tapa delantera respectivamente.

Figura 6. Análisis de: a) Esfuerzos de Von Mises y b) desplazamientos estáticos en la cámara interna.

Figure 6. Analysis of: a) Von Mises stresses, and b) static displacement in internal camera.

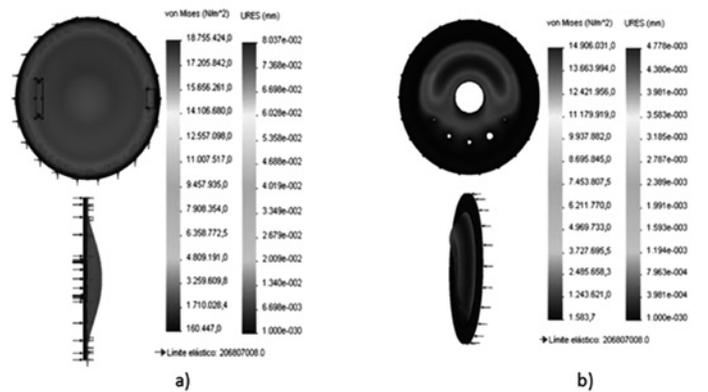


Al realizar la simulación asistida por software de esfuerzos y deformaciones en la cámara interna del horno se observa, en la figura 6, que las zonas críticas de tensión bajo el teorema de Von Mises son las zonas donde la cámara interna se une con los visores; sin embargo, estos valores críticos están muy por debajo del límite elástico del material que es aproximadamente 240 MPa [11].

El desplazamiento estático se produce en las superficies de la cámara en la parte superior, en la zona entre los visores con un desplazamiento máximo de $2,4 \times 10^{-2}$ mm, muy pequeño frente a la resistencia en el límite elástico del material antes de pasar a la zona plástica. Se concluye que para una presión de 15 psi (2×10^5 Pa) (similar a la atmosférica de 14,7 psi), la cámara interna del horno tendrá un factor de seguridad de ~ 13 . La simulación de esfuerzos por presión de vacío en las tapas, como se representa en la figura 7, fue realizada para presión atmosférica. La zona crítica de la tapa trasera es el hemisferio superior ya que los racores ofrecen apoyos que mejoran la resistencia del material. El factor de seguridad determinado es ~ 14 . La zona central de la tapa delantera es su área crítica, sin embargo el factor de seguridad para presión atmosférica es de 11 y para presión de operación es de 4.

Figura 7. Análisis de tensiones de Von Mises y desplazamiento estático en: a) Tapa delantera, b) tapa trasera.

Figure 7. Von Mises stresses and static displacement analysis in: a) Front cover, b) back cover.



Para la bisagra, como se representa en la figura 8, la simulación arrojó un factor de seguridad de 50 al configurar una carga en voladizo de la tapa delantera de 16 kg. Siendo conservativo, en cualquier situación imprevista, para una fuerza de 500 N mantiene un factor de seguridad de 18.

En lo concerniente a la mesa del horno se evaluó la resistencia de la zona crítica que es la estructura de la repisa superior. Ésta debe resistir el peso del cuerpo del horno, la antorcha, el crisol y el fluido refrigerante (aproximadamente 135 kg). Para evaluar la resistencia a la deformación

utilizaremos una masa de 250 kg (2450 N) para ser conservativos en caso de añadir algún componente extra al equipo o en caso de evitar una falla por cualquier masa que pudiese adicionarse.

El análisis de la mesa demostró que la deformación máxima se presenta en el tubo paralelo a la orientación del horno con un valor máximo de 0,16 mm lo que aún se encuentra en el límite elástico del material y no presenta problema alguno. Las tensiones máximas se presentaron en las zonas donde están las uniones por soldadura con el marco superior de la mesa del horno. El factor de seguridad más bajo es de 2,8 para una masa de 250 kg, recalando que la masa real es de 135 kg por lo cual el factor de seguridad no será sobrepasado.

4.2. Factores ergonómicos y operacionales

Los factores mínimos de seguridad sugeridos por la AISI (*American Institute for Steel Construction*) para recipientes soldados de acero sometidos a cargas de tensión y compresión están comprendido entre 1,11 y 1,67 [12]. Entonces, si se comparan los resultados obtenidos en las simulaciones computacionales se observan valores de factores de seguridad superiores a los mínimos exigidos, lo que agrega un componente de confiabilidad al diseño.

Para los cálculos durante la purga en vacío, la presión de operación (aproximadamente 45 psi) estimada en las paredes del recipiente podrían soportar una presión máxima de 62,5 psi, con la cámara construida con un lámina de espesor de 1/8" (~3mm). Los cálculos también arrojaron que el espesor de las tapas debe ser mínimo de 1/2" (12,5mm); sin embargo, este valor es para una presión de 45 psi, recordando que la presión real de operación es próxima a 2×10^5 Pa. Las simulaciones demostraron que para la cámara interna, los esfuerzos máximos se presentan en las uniones entre esta última y los cuellos de los visores (con esfuerzos máximos de 15,7 MPa); sin embargo, el factor de seguridad de ~13 indica que la resistencia de la cámara es óptima para su operación.

La simulación de esfuerzos de la tapa trasera, también afectada por la presión externa a causa del vacío de la cámara, arrojó un valor de esfuerzos máximos de 14,9 MPa frente a un límite elástico de 206,8 MPa por lo que el factor de seguridad fue de 13,8. Además las deformaciones máximas arrojaron un valor de 0,005 mm, valor que recae en el límite elástico del material y de dimensiones de deformación insignificantes. La simulación de esfuerzos de la tapa delantera arrojó un valor de esfuerzos máximos de 18,7 MPa frente a un límite elástico de 206,8 MPa por lo que el factor de seguridad fue de 11. Las deformaciones máximas tuvieron un valor de 1×10^{-2} mm, valor que está dentro del límite elástico del material y de dimensiones de deformación insignificantes.

Figura 8. Análisis de: (a) Tensiones de Von Mises y (b) desplazamiento estático en la bisagra.

Figure 8. Analysis of: (a) Von Mises stresses and (b) static displacement in Hinge

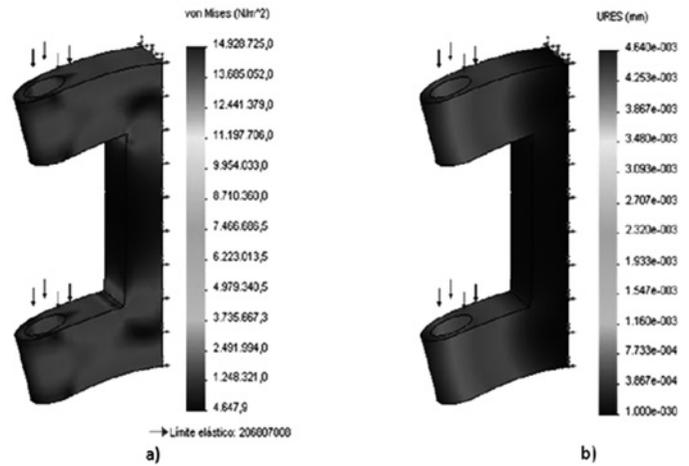
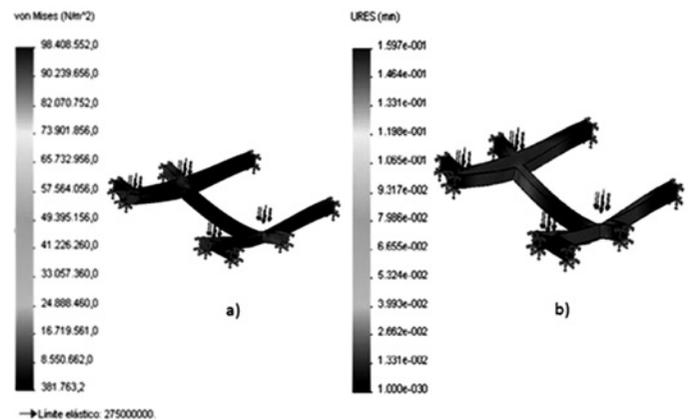


Figura 9. Tensión Von Mises (a) y desplazamiento estático (b) en la parte superior de la mesa del horno

Figure 9. Analysis of: (a) Von Mises stresses and (b) static displacement on the top of furnace supporting table.



Estos resultados son los arrojados por las simulaciones trabajando con una presión de 15 psi, similar a la atmosférica, sin embargo, como la norma indica la presión de prueba fue de 45 psi. Para esta presión los resultados de los factores de seguridad de la cámara interna, tapa trasera y tapa delantera fueron aproximadamente de 4 para cada uno de los componentes. El factor de seguridad arrojado para el diseño de la bisagra para la masa de la tapa delantera fue de 50, sin embargo para ser conservadores se realizaron simulaciones con una masa de 50 kg lo que arrojó un factor de seguridad de 18. En la mesa del horno, se simuló el esfuerzo en la parrilla superior debido al peso soportado por los 4 soportes con rodamientos en los nodos específicos de la estructura de la masa del equipo completo. El horno

ensamblado totalmente y en operación tendrá una masa aproximadamente de 135 kg, sin embargo se realizó la simulación con una masa de 250 kg para ser conservativos en el diseño. El resultado fue un factor de seguridad de 2,8 lo que indica que el diseño en la estructura fue el correcto.

Para realizar el diseño mecánico del Horno de Fusión al Arco Eléctrico se hizo necesario determinar algunos parámetros. Para el primer parámetro de funcionalidad se tuvo en cuenta la eficacia del horno, es decir que cumpla con su trabajo. Es tal vez el parámetro más importante pues es la esencia de cualquier diseño. En este caso la funcionalidad del horno depende del correcto diseño de los componentes, las dimensiones del cuerpo del horno, las dimensiones del banco, el correcto acople y selección de los subsistemas. Entre estos parámetros se encuentra la selección de sellos para mantener la cámara al vacío, la tornillería, rodachinas, rodamientos, válvulas, sensores, entre otros.

El siguiente parámetro es el de ergonomía, éste persigue encontrar la facilidad y comodidad del operario de manejar el equipo para realizar su trabajo. La figura 10 representa gráficamente factores como la altura de la manopla con respecto al suelo (1,20 m), la distancia desde la manopla hasta el flanche delantero (longitud máxima de abertura de ambas manos aproximada de 90 cm), la altura de los visores que se encuentran a una altura aproximada de 1,50 m, la inclinación de los mismos que incrementa la posibilidad de fatiga en el cuello del operador pero que a la vez permitan el paso de la luz dentro de la cámara (diseñados a 30° con respecto a la horizontal que divide al horno a la mitad de manera transversal). Estas dimensiones se definieron con referencia a una persona de estatura promedio de 1,70 m. Actualmente se lleva a cabo un proyecto para eliminar el control del pie para generar el arco eléctrico, llevando el control de este hasta la manopla del horno.

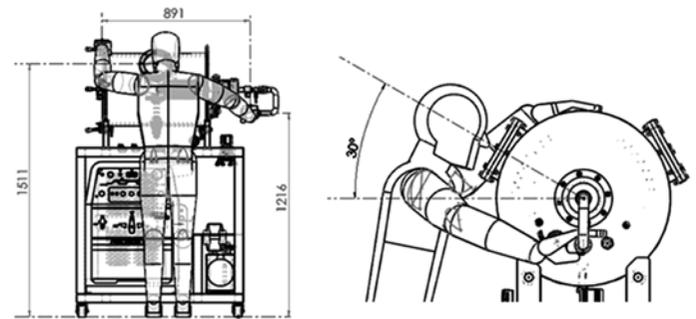
Uno de los parámetros importantes para dar muestra de la viabilidad del proyecto son los parámetros de economía. La evaluación de materiales de construcción para el prototipo demuestra lo comercial y asequible de éstos (acero inoxidable A304, el cobre de tipo OFCH libre de oxígeno, el vidrio para el visor de Borosilicato, los sellos de VMQ Siliconado, la tornillería igualmente de acero inoxidable y el acero estructural A36 del banco y el brazo del horno). Los componentes como mangueras, tuberías, válvulas y otros se pueden obtener en el mercado a precio asequible.

Por último, para realizar el diseño del prototipo, dar dimensiones y seleccionar geometrías para cada uno de los componentes, fue necesario realizar algunos cálculos previos de resistencia de los materiales. Principalmente se evaluó, basado en teorías de diseño de recipientes sometidos a presión externa y al vacío, el diseño de la cámara del horno que es el componente más vulnerable del HEV. Para esto

se utilizó al código ASME Sección VIII División 1 que trata sobre el diseño de recipientes a presión. Los cálculos (no detallados aquí) muestran que el horno HEV estará sometido a esfuerzos menores frente a la resistencia para el acero 304 (13,8 ksi) según lo establecido en el código ASME [8]. Como complemento al diseño ergonómico, la facilidad de portabilidad del dispositivo es potencializada a través de múltiples conectores rápidos que permiten la conexión y desconexión inmediata de accesorios como entradas y salidas de gases, líquidos e instrumentación complementaria.

Figura 10. Consideraciones ergonómicas tenidas en cuenta en el diseño del horno

Figure 10. Ergonomic considerations for melting furnace design



5. CONCLUSIONES

- Se desarrolló el diseño de un prototipo de horno al arco voltaico HEV para fundir materiales metálicos de hasta 3000° C y con una carga de 100grf. El diseño permitió articular parámetros de funcionalidad, ergonomía y economía.
- El diseño respondió a requerimientos de permitir la operación con atmósfera controlada con presión estática entre 0,5 a 0,85 atm, refrigeración por agua a temperatura ambiente, vacío con bomba mecánica comercial y operación confortable para personas entre 1,50 a 1,90 m de estatura
- El modelado computacional permitió a través de cálculos de las tensiones de Von Mises y del desplazamiento estático seleccionar el adecuado dimensionado del HEV, garantizando una operación segura para el operario.
- El diseño compacto junto con las múltiples conexiones para diferentes accesos de consumibles y despeje de residuos conforman la portabilidad del HEV diseñado.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen a la Universidad Autónoma del Caribe por el apoyo financiero a través del proyecto interno CONV-I-P-0011.

REFERENCIAS

- [1] Snell, J. J. (2010) *Improved modeling and optimal control of an electric arc furnace*. Thesis, University of Iowa. Disponible desde: <<http://ir.uiowa.edu/etd/741>> [Acceso 15 de abril 2013].
- [2] Stavinoha, J. N. (2012) *Investigation of plasma arc welding as a method for the additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy components*. Montana Tech of the University of Montana. Disponible desde: <<http://gradworks.umi.com/15/16/1516742.html>> [Acceso 15 de abril 2013].
- [3] Anikeev, V.N., Dokukin, M. Y., Khvesyuk, V. I., Vichniakova, S. M., Pshenichnikov, A. A. (1998) *Small size electric arc melting furnace with metal electromagnetic stirring* [internet], Bauman Moscow State Technical University. Disponible desde: <134.147.160.41/ispcdocs/ispc14/content/14/14-1933.pdf>
- [4] Anikeev, V.N., Dokukin, M. Y., Khvesyuk, V. I. (1999) *Small size electric arc melting furnace* [internet], Bauman Moscow State Technical University. Disponible desde: <epsppd.epfl.ch/Praha/web/98ICPP_W/k002pr.pdf>
- [5] Cervantes, J. F. (2012). *Diseño mecánico de un horno por fusión al arco eléctrico con atmósfera controlada para la fabricación de aleaciones metálicas*. Trabajo de grado, Universidad Autónoma del Caribe, 2012.
- [6] Jiménez, J.J., Resumen del curso de tecnología de los materiales II, El Cid editor, Argentina, 2009.
- [7] Talavera, L. E. & Farías, M., *El Vacío y sus Aplicaciones* (La Ciencia para todos). Fondo de Cultura Económica de España, 2008.
- [8] *American Society of Mechanical Engineers. Boiler & Pressure Vessel Code. II Part D, Properties (Customary) Materials*. N.Y., USA, 2009.
- [9] Brotons, P., *Construcción de estructuras metálicas*, Editorial Club Universitario, España, 2010.
- [10] Maury, H., Niebles, E., Torres, J., *Diseño para la fabricación y ensamble de productos soldados: un enfoque metodológico y tecnológico*, Ediciones Uninorte, Barranquilla, 2009.
- [11] Avallone, E. et al. *Marks' standard handbook for mechanical engineers*, McGraw-Hill, New York, 2007.
- [12] Budynas, R.G., *Diseño en ingeniería mecánica* de Shigley, McGraw-Hill, México, 2008.