



Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Centro de Investigaciones de Soldadura

Facultad de Ingeniería Mecánica

Tesis en Opción al Título de Ingeniero Mecánico

**Extrusora de laboratorio para la fabricación de
electrodos doblemente recubiertos**

Autor: Yandriel Hernández Bernal

Tutor: Dr. Carlos René Gómez Pérez

Curso 2014-2015



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería Mecánica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Tutor

Firma del Jefe de
Departamento donde se
defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

Pensamiento:

*La inteligencia consiste no solo en el conocimiento,
sino también en la destreza de aplicar
los conocimientos en la práctica.*

Aristóteles

DEDICATORIA:

Toda mi familia, principalmente a mi madre, mi padre y mi hermano que tanto me apoyan.

Agradecimientos:

- A mi madre que con mucho amor y cariño ha hecho de mí un hombre de bien.
- A mi hermano por que sin la ayuda del no hubiera logrado cruzar los dos últimos años, por siempre apoyarme en los momentos difíciles e inculcarme un ejemplo de unidad inquebrantable.
- A mi padre que es puntal y ejemplo en mi vida y por ser el más fuerte rival que pone a prueba mis conocimientos.
- A mi tutor por su apoyo, colaboración y por dedicarme esenciales minutos de su tiempo.
- Al compañero Odonel por su ayuda y disposición en la realización de este trabajo.
- A todos los profesores que durante mi trayecto por el nivel superior contribuyeron de una forma u otra, a mi formación como profesional.
- A todos mis amigos y compañeros en especial a Oscar, Yalier, Roilan, Dayra y Darían.

A todos muchas gracias.

ÍNDICE

Resumen:	1
Introducción:	3
Capítulo I: Extrusoras para electrodos	6
1.1. Tipos de extrusoras y principio de funcionamiento	6
1.2. Consideraciones dimensionales para el diseño de la extrusora	13
1.3. Consideraciones sobre la selección de los materiales	16
1.4. Software de diseño para el dimensionamiento y la simulación de la extrusora	17
1.5. Conclusiones parciales	18
Capítulo II: Construcción de la extrusora experimental	19
2.1. Diseño de la extrusora experimental	19
2.2. Simulación de la extrusora experimental	21
2.3. Construcción de la extrusora experimental	26
2.4. Conclusiones parciales	29
Capítulo III: Evaluación de la extrusora experimental	30
3.1. Aplicación de la extrusora experimental	30
3.2. Ventajas económicas de la extrusora experimental construida	40
3.3. Conclusiones parciales	45
Conclusiones Generales	46
Recomendaciones	47
Referencias	48
Anexo 1	51
Anexo 2	52
Anexo 3	58

Resumen:

En el presente trabajo se diseña, simula y construye una extrusora experimental para el recubrimiento multicapa de electrodos para aplicaciones especiales basadas en el proceso de soldadura manual con electrodo revestido. La extrusora cuenta de cuatro tipos de piezas diferentes: cuerpo (100x110x105 mm), tres trefiles de salida (con diámetros interiores de 4,45 mm, 5,71 mm y 6,5 mm, respectivamente), tres guías para electrodo (con diámetros interiores de 2,00 mm; 4,45 mm y 5,71 mm, respectivamente) y un pistón (\varnothing 20 mm), fabricados todos de acero ASISI 1010. El proceso de simulación se realiza con el software *SolidWorks* 2012 x 64bit, empleando $400 \text{ kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$ en la zona de los agujeros del pistón y de la cavidad de conducción de la mezcla hacia el trefil. La simulación muestra que el material no sobrepasa el límite elástico (desplazamientos $< 2,7\cdot 10^{-3} \text{ mm}$ y deformación unitaria máxima $< 4,38\cdot 10^{-4}$ mm). Los trefiles cuentan en su parte delantera con un orificio para la guía del núcleo del electrodo, con formas y dimensiones, que garantiza un proceso de extrusión de capas superpuestas (doble recubrimiento) con la concentricidad requerida. Los electrodos fabricados responden adecuadamente durante el proceso de soldadura manual al que fueron sometidos, pudiéndose constatar, a través de la adquisición de las señales eléctricas del arco de soldadura, que su comportamiento operativo fue satisfactorio.

Palabras clave:

Extrusora experimental, recubrimiento electrodos, diseño, proceso SMAW.

Abstract:

Presently work is designed, simulated and built an experimental extruder for recover multilayer electrodes for special applications based on shielding manual arc welding process. The extruder is composed of four different types of pieces: body (100x110x105 mm), three exit trefil (with interior diameters of 4,45 mm, 5,71 mm and 6,5 mm, respectively), three guides for electrode (with interior diameters of 2,00 mm; 4,45 mm and 5,71 mm, respectively) and a piston (\varnothing 20 mm), manufactured all of steel ASISI 1010. The simulation process is carried out in SolidWorks 2012 x 64bit software, using $400 \text{ kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$, apply in the area of the holes of the piston and of the cavity of conduction of the mixture toward the trefil. The simulation shows that the material doesn't surpass the elastic (displacements $< 2,7\cdot 10^{-3}$ mm, and deformation unitary maxim $< 4,38\cdot 10^{-4}$ mm) limit. The trefil has in their front part a hole for the guide of the nucleus of the electrode, with forms and dimensions that it guarantees a process of extrusion of layers superimposed (double layer) with the required concentricidad. The manufactured electrodes respond appropriately during the process of manual welding to which were subjected, being able to verify, through the acquisition of the electric signs of the welding arch, that their operative behavior was satisfactory.

Key words:

Experimental extruder, coating electrodes, design, SMAW process.

Introducción:

El Centro de Investigaciones de Soldadura lleva casi 27 años dedicados al estudio de obtención de materiales para soldar. Dentro de los materiales más estudiados están los electrodos para distintas aplicaciones: tanto para la soldadura, como para la recuperación de piezas [1].

Los electrodos comúnmente desarrollados están formados por un único recubrimiento [2]. Cuentan con más de uno, los electrodos destinados a la soldadura subacuática mojada, donde el segundo es un aislante del agua o impermeabilizante [1,3,4].

En la soldadura de recuperación, los electrodos más comunes presentan un único recubrimiento, en el que se mezclan componentes ordinarios de los electrodos, con ferroaleaciones [5]. La aplicación de este tipo de electrodo, si bien ha resuelto los problemas hasta hoy día, pudiera conducir a una tasa de pérdidas considerables, presumiblemente debido a la confluencia (en forma de mezcla mecánica) de los componentes (generalmente oxidantes del recubrimiento) con los de la carga de aleación [4]. El proceso de oxidación prematuro durante la fusión de los recubrimientos, puede oxidar las ferroaleaciones, impidiendo que estas se combinen con el hierro del núcleo del electrodo y el carbono del recubrimiento, evitando la formación de carburos, que son los encargados de producir estructuras resistentes al desgaste [1].

La obtención de electrodos de doble capa, donde las ferroaleaciones se encuentran separadas de la carga oxidante de los recubrimientos constituye una línea de investigación del centro de soldadura (CIS-FIM) desde hace algunos años; sin embargo, no se cuenta con extrusoras, que permitan, con pocos volúmenes de materiales, obtener electrodos de la calidad requerida para lograr la reproducibilidad requerida en los experimentos.

Atendiendo a ello, se identifica el siguiente:

Problema

No se cuenta con extrusoras que permitan obtener electrodos doblemente recubiertos con pocos volúmenes de materiales, con la concentricidad y reproducibilidad requerida en los experimentos.

Considerando los aspectos antes mencionados, se propone como:

Objetivo General

Construir una extrusora experimental, que permita un consumo mínimo de revestimiento durante la fabricación de cada prototipo de electrodo, en las variantes de una y dos capas.

El objetivo general previsto puede desglosarse en los siguientes:

Objetivos específicos

1. Diseñar, mediante el *software SolidWorks 2012*, una extrusora experimental, que permita un consumo mínimo de revestimiento durante la fabricación, a escala de laboratorio, de cada prototipo de electrodos, en las variantes de una y dos capas.
2. Simular, mediante el *software SolidWorks 2012*, la extrusora experimental diseñada, para evaluar su comportamiento durante la aplicación de las cargas requeridas en la fabricación de cada prototipo de electrodos revestidos, en las variantes de una y dos capas.
3. Construir la extrusora experimental diseñada, considerando los requerimientos técnicos de diseño para permitir un consumo mínimo de revestimiento y su adecuado funcionamiento durante la fabricación, a escala de laboratorio, de cada prototipo de electrodos, en las variantes de una y dos capas.
4. Hacer los cambios pertinentes al diseño de la extrusora, mediante la modificación de los trefiles o de su funcionamiento, tal que permita cumplir con su objetivo fundamental.
5. Probar los electrodos fabricados, mediante el proceso de soldadura manual, adquiriendo las señales eléctricas del arco de soldadura, tal que se corrobore la adecuada metodología de fabricación de los electrodos.

Atendiendo a los objetivos específicos se planifican las siguientes:

Tareas:

1. Diseño de una extrusora experimental para el recubrimiento de electrodos de una y dos capas.
2. Simulación de la extrusora experimental durante su trabajo a presión interna.
3. Reajuste dimensional de la extrusora.
4. Construcción de la extrusora experimental diseñada.
5. Evaluación preliminar de la fabricación de los electrodos elaborados.

Novedad:

Extrusora experimental que emplea una mínima cantidad de masa destinada al recubrimiento de electrodos con múltiples capas.

Hipótesis:

La ubicación de la guía de entrada del núcleo (desnudo o recubierto) y de salida del electrodo en un mismo trefil, garantiza la coaxialidad necesaria entre los recubrimientos bicapa elaborados en una extrusora experimental destinada a la fabricación de electrodos revestidos.

Aporte tecnológico:

Dispositivo para la extrusión de múltiples capas sobre núcleos de electrodos empleando una mínima cantidad de masa.

Capítulo I: Extrusoras para electrodos

1.1. Tipos de extrusoras y principio de funcionamiento

Existen diferentes tipos de extrusoras para diversas aplicaciones y con principios distintos de funcionamiento.

Existen extrusoras para obtener distintos productos de plástico, cerámicas, metales, alimentos, etc. y sus combinaciones. Igualmente, constructivamente se diferencian en la forma de impulsión de las mezclas: mediante pistones, tornillos sin fin, etc. Por otra parte, también se diferencian su diseño por la cantidad de materiales con que trabajan simultáneamente; es decir, por la cantidad de alimentadores independientes que poseen.

Así por, ejemplo, hay extrusoras (Figura 1) que se emplean para producir una doble capa de plástico tubular que no posea desviaciones en su espesor [6].

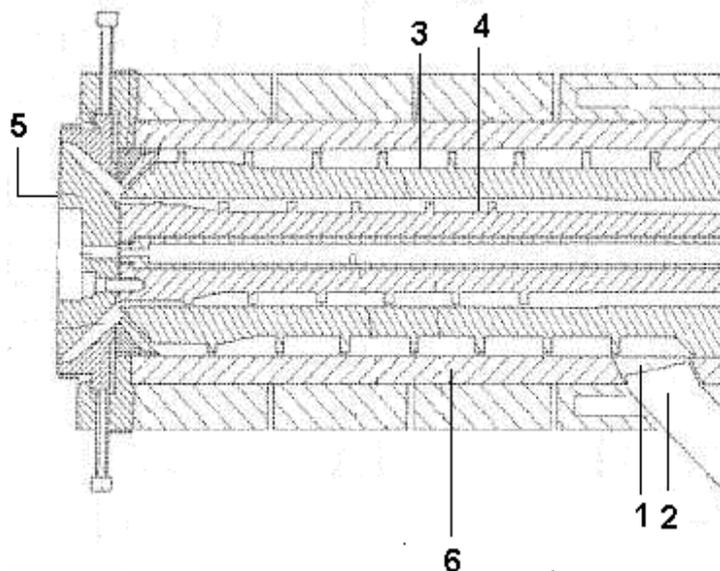


Figura 1: Extrusora doble para plástico tubular

Esta extrusora posee como desventaja que el material de trabajo de este equipo es plástico caliente el cual bajo estas condiciones posee cierta fluidez y es menos abrasivo que los materiales utilizados en el recubrimiento del electrodo, que son granulados, ejercen un efecto de abrasión considerablemente mayor y requieren de mucha mayor presión de compresión.

Otra máquina la constituye la presentada en la patente CN2318025Y, (Figura 2) que realiza la extrusión doble de plástico por dos salidas diferentes. En este caso el plástico es suministrado por un solo sistema de alimentación (1), es comprimido y forzado, por un tornillo sinfín (2), a pasar a través de un sistema divisor que se encarga de compartir el material por dos canales (3) y (4); posteriormente pasa al cabezal del molde con doble salida, el cual puede ser sustituido, según el perfil que se quiera obtener, tal como varillas, tubos, planchas, hilos de plástico.

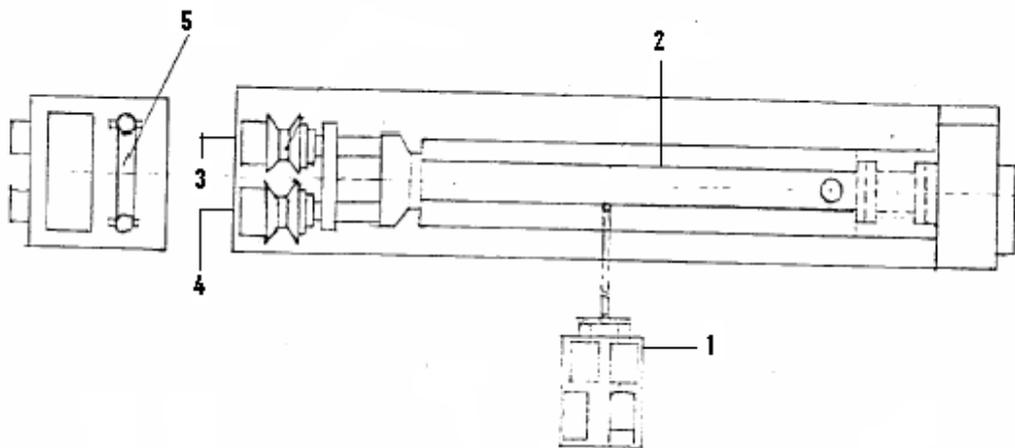


Figura 2: Extrusora doble para plástico

Este sistema de extrusión es capaz de producir los perfiles cilíndricos huecos (tubos), puede operar con dos materiales simultáneamente sin que estos se mezclen. Sin embargo, los componentes que están en constante contacto con el material a extrudir fueron diseñados para operar con plástico, por lo que no puede realizar el recubrimiento de electrodos, proceso en el cual los materiales empleados son mucho más abrasivos y con menos fluidez, lo que requeriría de mayores presiones y resistencia al desgaste por fricción, lo cual puede conducir a la destrucción del equipo.

Otra máquina (Figura 3) es una extrusora doble [7] para la producción de ladrillos huecos de gran resistencia, puede alcanzar una presión de extrusión entre 1,2 MPa y 1,8 MPa, posee un sistema de alimentación (1) por la que es surtida la arcilla con la que serán hechos los ladrillos, posteriormente esta es comprimida por un tornillo sinfín, que posee dos pasos (2a) y (2b), para forzar doblemente al material a pasar a través de la boquilla (3) que se encuentra en el cabezal y es la encargada de proporcionar la forma deseada al producto final.

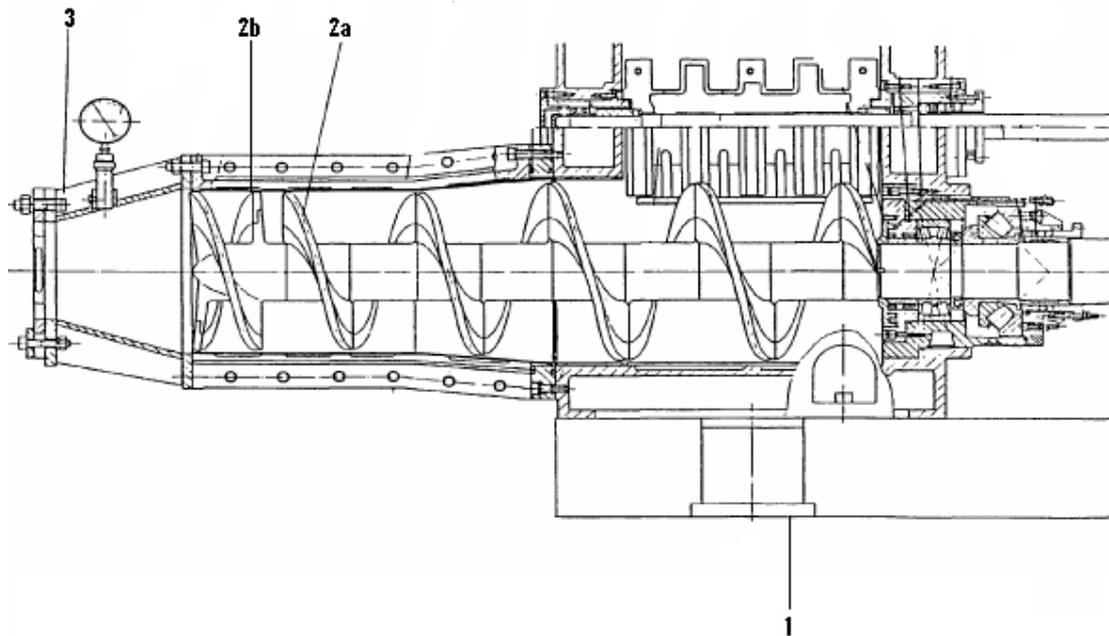


Figura 3: Extrusora doble para ladrillos

Esta máquina tiene como ventaja que trabaja con materiales similares a los que forman los recubrimientos de los electrodos, o sea granulados altamente abrasivos, posee una alta presión de extrusión lo que proporciona buen grado de compactibilidad del producto, pero debido a sus dimensiones es dificultoso y costoso su uso a nivel de laboratorio y su trefil de salida no permite la obtención de electrodos.

La extrusora de la patente CN 201253946Y [8], (Figura 4), se emplea en el recubrimiento de piezas cilíndricas, esta posee un sistema de alimentación (1), que es dividido en dos sistemas individuales (2) y (3) para lograr alimentar los dos canales por los que se comprime el material, empleado en el recubrimiento de los perfiles cilíndricos, logrando una excelente concetricidad de la capa asegurando la uniformidad del espesor de la misma a lo largo de toda la superficie. Esta compresión del material para su extrusión es proporcionada por tres tornillos sinfín (4, 5 y 6), que lo fuerzan a salir por la boquilla (8), la cual posee la forma deseada y además se encarga de centrar y sujetar el material que va a ser cubierto.

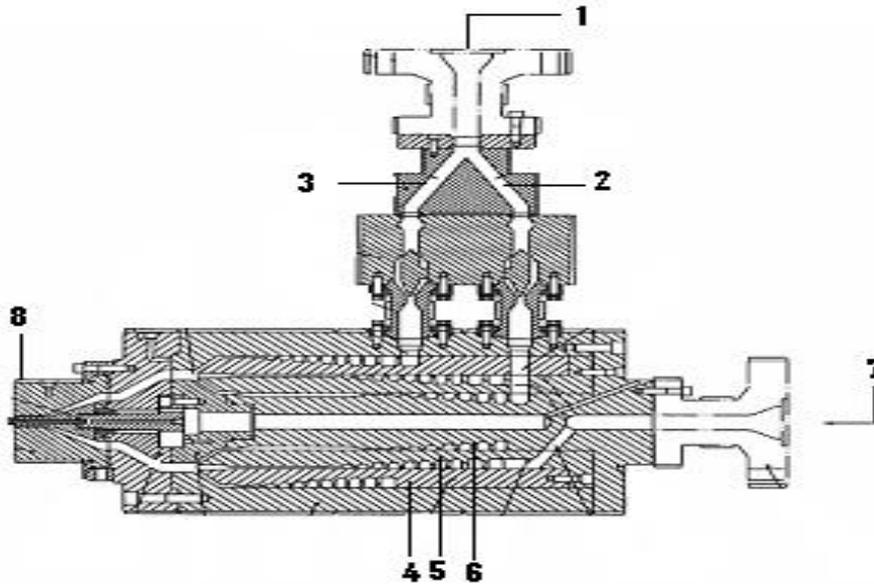


Figura 4: Extrusora doble para recubrimiento de piezas cilíndricas

Este dispositivo presenta dos sistemas de compresión independientes para el recubrimiento de piezas cilíndricas, pero posee un solo sistema de alimentación por lo que no puede trabajar con dos materias diferentes al mismo tiempo, además opera con plástico, que posee características diferentes a los materiales que forman el recubrimiento del electrodo. También sus dimensiones son demasiado grandes como para ser empleada como un equipo económico y portátil.

La extrusora de la patente GB 1036465 A realiza el doble recubrimiento de cables eléctricos con materiales plásticos, logrando una concetricidad uniforme a lo largo de todo el perfil y un espesor constante. Posee (Figura 5) dos canales independientes de alimentación (1) y (2), que aportan los materiales que se emplean en las dos capas, las que son extruidas sobre el núcleo metálico (3).

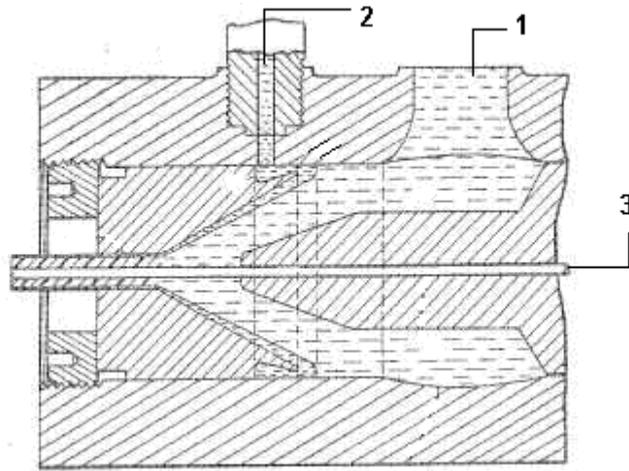


Figura 5: Extrusora doble para recubrimiento de conductores eléctricos.

Este sistema, se acerca a cumplir con las necesidades de operación para el proceso de fabricación de electrodos doblemente recubiertos, ya que aplica dos capas de recubrimiento sobre el núcleo metálico, operando con dos materiales distintos, sin que estos se mezclen, pero el material con el que trabaja es plástico caliente, que posee propiedades diferentes a los materiales que componen las capas de recubrimiento del electrodo, por lo que los accesorios y piezas de este equipo no sirven para la fabricación de recubrimiento de electrodos.

La máquina de la patente JP 59029141 A [9] se emplea en el doble recubrimiento de perfiles cilíndricos metálicos aplicando sobre el mismo dos capas simultáneamente (Figura 6). Este dispositivo posee dos canales independientes de alimentación (1) y (2) que suministran los materiales necesarios para las capas que serán aplicadas sobre el núcleo metálico (3). Esta extrusora es muy utilizada en la fabricación de conductores eléctricos.

Como ventaja fundamental de esta extrusora puede destacarse la posibilidad de trabajar con dos materiales independientes, aplicándose en dos capas de recubrimiento independientes, pero las características del material de trabajo con que opera, y para el que fue concebido este equipo, le imposibilita la realización del recubrimiento de electrodos.

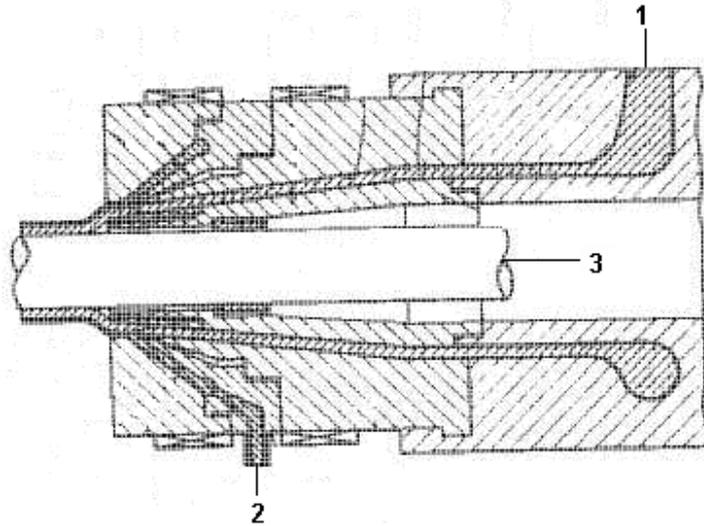


Figura 6: Extrusora doble para el recubrimiento de perfiles cilíndricos metálicos

En el Centro de Investigaciones de Soldadura de la UCLV se utiliza comúnmente la extrusión (Figura 7) indirecta [10]. El alma o núcleo (1) se coloca dentro de la camisa (2), hasta insertarse en el alojamiento del pistón inferior (3). La masa (4) se introduce posteriormente, tratando de que quede uniformemente distribuida entre la pared interior de la camisa (2) y la exterior del alma o núcleo (1). El pistón deslizable (5) se emplea para comprimir la masa (4) entre las caras interiores de los pistones inferior (3) y deslizable (5). Las dimensiones se ajustan a las del electrodo a fabricar.

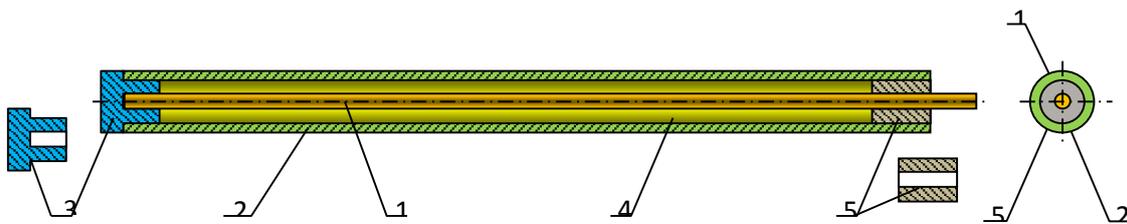


Figura 7: Esquema de una extrusora manual para extrusión indirecta

Para el funcionamiento de este equipo el pistón inferior (3) debe quedar fijo, sobre una mesa, mientras que el interior deslizable (5), se hace mover mediante un tubo, que se coloca entre la pared interior de la camisa (2) y la exterior del alma (1). Luego de compactar la mezcla, se retira la inmovilización del pistón inferior (3) y se continúa presionando el pistón deslizable (5), hasta conseguir sacar completamente el electrodo. De más está decir que el tubo empleado para presionar el pistón deslizable (5) debe tener la misma longitud del electrodo a fabricar [10].

Una extrusora para la fabricación de electrodos doblemente recubiertos es presentada en la literatura [10] (Figura 8), la cual es capaz de realizar el doble recubrimiento de electrodos para soldadura manual y es de fácil fabricación. El principio de funcionamiento de la misma se basa en la compresión de la masa de recubrimiento, que pasa a través de un trefil, y alrededor de un núcleo, ambos de diámetros variables.

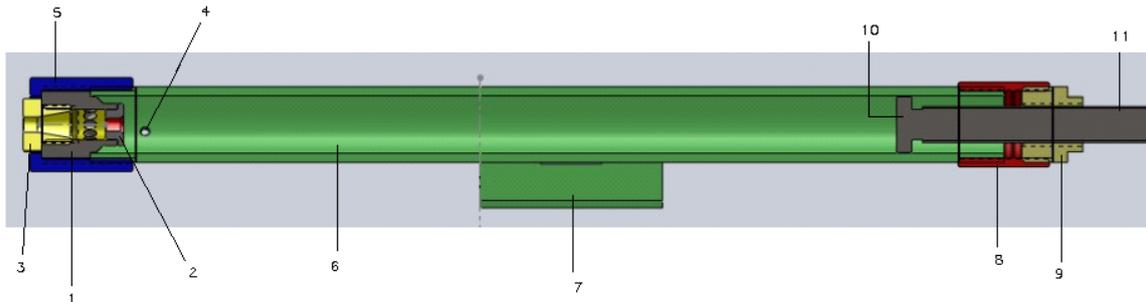


Figura 8: Esquema del diseño de la extrusora

La extrusora está constituida por un cilindro metálico, que conforma el canal de alimentación (6); un pistón (10), movido por un tornillo sin fin (11), que fuerza a la mezcla a salir a través del trefil de salida [3] que le aplica al electrodo el recubrimiento colineal a lo largo de todo su cuerpo. La tuerca de avance (9) se sujeta por el nudo (8) al cuerpo del cilindro y proporciona el desplazamiento al tornillo para comprimir la mezcla. Para la segunda capa solo se debe cambiar la guía del electrodo (2), que es la que se encarga de centrarlo para lograr la simetría del recubrimiento, y el trefil de salida para poner el del diámetro deseado. Para realizar estas operaciones en la extrusora solo se debe retirar el porta trefiles (1), que es prisionero de la tuerca de sujeción (5). La cámara presenta un orificio (4), que cumple la función de aliviadero para el excedente de mezcla que pueda existir y, además, disminuir las tensiones que existen dentro de la cámara. La presilla de sujeción (7) es la que permite fijar el equipo en el lugar en el cual será posteriormente utilizado.

En la extrusión directa la distribución de las tensiones a lo largo del recubrimiento es igual en toda su superficie. De este modo se eliminan defectos superficiales que disminuyen la calidad del electrodo.

En este diseño todas sus partes y componentes poseen cierta y determinada función. Sin embargo, debe prestarse especial atención al porta trefiles (Figura 9), ya que este es el

que determinará la calidad final del electrodo, debido a que debe sujetar la guía del núcleo metálico y soporta el trefil de salida, además, posee los canales de alimentación a través de los cuales pasarán los componentes que conformarán el recubrimiento del electrodo. Para cumplir con todas estas funciones es una de las piezas más complejas de maquinar en todo el conjunto; otro motivo para resaltar su importancia en el equipo.

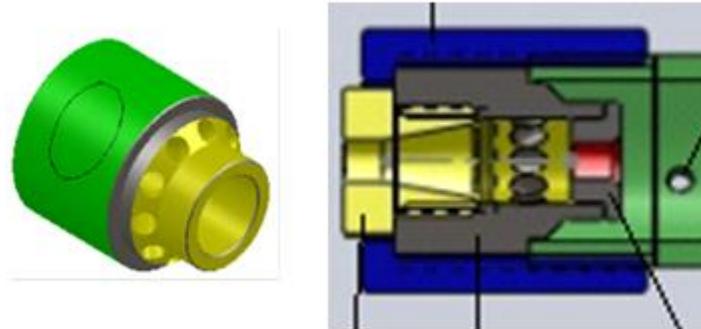
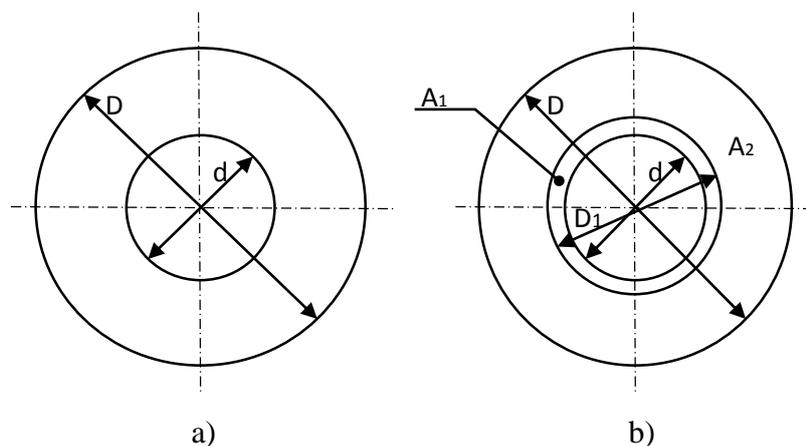


Figura 9: Porta trefiles

La desventaja mayor de esta extrusora radica en que precisa trabajar con mezclas relativamente húmedas. Por ello, el uso de esta extrusora no se recomienda para trabajos con mezclas secas.

1.2. Consideraciones dimensionales para el diseño de la extrusora

El dimensionamiento de la extrusora se basa en las relaciones geométricas de posicionamiento de los recubrimientos sobre el alma de los electrodos (Figura 10). Existen tres tipos de combinaciones posibles: a) simplemente recubierto (Figura 10a); b) doblemente recubierto, con las ferroaleaciones internas (Figura 10b); y c) doblemente recubierto, con las ferroaleaciones externas (Figura 10c)



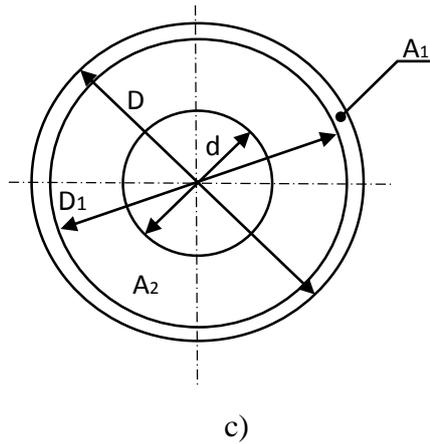


Figura 10: Esquemas geométricos para el cálculo conformación de los recubrimientos en los electrodos

- a) simplemente recubierto
- b) doblemente recubierto (ferroaleaciones internas)
- c) doblemente recubierto (ferroaleaciones externas)

Las relaciones geométricas (Ecuación 10) se establecen a partir de las áreas de las secciones transversales de los recubrimientos de la ferroaleación (A_1) y de la matriz (A_2). En lo adelante, el subíndice 1 corresponde a las dimensiones referidas a la disposición de la ferroaleaciones y el 2, a la matriz.

$$A_T = A_1 + A_2 \quad (1)$$

La razón (R) entre ambos recubrimientos indica la proporción entre las áreas (Ecuación 2), resultando cada una de ellas proporcionales al área total (A_T) (Figura 10) en función de ciertos coeficientes (a , b).

$$R \cdot A_1 = A_2 \quad (2)$$

$$A_1 = a \cdot A_T \quad A_2 = b \cdot A_T \quad (3)$$

Las proporcionalidades pueden ser también expresadas a partir de la combinación simultánea de las áreas (Ecuación 4), así como también las relaciones entre los coeficientes de proporcionalidad (Ecuación 5)

$$A_T = A_1 / a = A_2 / b \quad \frac{b}{a} \cdot A_1 = A_2 \quad (4)$$

$$R = \frac{b}{a} \quad (5)$$

A partir de las relaciones entre las áreas (Ecuaciones 5 y 6) es posible determinar la razón entre sus diámetros (Figura 10) y asociarlas a los espesores del recubrimiento ordinario (δ_1) y del de las ferroaleaciones (δ_2).

$$A_1 = \delta_1 \cdot P_1 = \frac{\pi}{4}(D_1^2 - d^2) \quad (6)$$

$$A_2 = \delta_2 \cdot P_2 = \frac{\pi}{4}(D^2 - d_1^2) \quad (7)$$

Si el perímetro (P_i) de ambas áreas (Ecuación 8, para las ferroaleaciones y Ecuación 9, para la matriz) se relaciona (Ecuaciones 10 y 11) con sus respectivos espesores (δ_1 , δ_2), a través de sus diámetros, entonces pueden obtenerse los diámetros intermedios para cada combinación (Figura 10b y Figura 10c).

$$P_1 = \pi * d_{m1} \quad (8)$$

$$P_2 = \pi * d_{m2} \quad (9)$$

$$\delta_1 = \left(\frac{D_1}{2} - \frac{d}{2}\right) \quad (10)$$

$$\delta_2 = \left(\frac{D}{2} - \frac{D_1}{2}\right) \quad (11)$$

$$d_{m1} = d + \delta_1 = d + \left(\frac{D_1}{2} - \frac{d}{2}\right) = \left(\frac{D_1}{2} + \frac{d}{2}\right)$$

$$d_{m2} = D - \delta_2 = D - \left(\frac{D}{2} - \frac{D_1}{2}\right) = \left(\frac{D}{2} + \frac{D_1}{2}\right)$$

$$R \left(\frac{D_1}{2} - \frac{d}{2}\right) \cdot \pi \left(\frac{D_1}{2} + \frac{d}{2}\right) = \left(\frac{D}{2} - \frac{D_1}{2}\right) \cdot \pi \left(\frac{D}{2} + \frac{D_1}{2}\right)$$

$$R \left(\frac{D_1}{2} - \frac{d}{2}\right) \cdot \left(\frac{D_1}{2} + \frac{d}{2}\right) = \left(\frac{D}{2} - \frac{D_1}{2}\right) \cdot \left(\frac{D}{2} + \frac{D_1}{2}\right)$$

$$R \left(\frac{D_1^2}{4} + \frac{d \cdot D_1}{4} - \frac{d \cdot D_1}{4} - \frac{d^2}{4}\right) = \left(\frac{D^2}{4} + \frac{D \cdot D_1}{4} - \frac{D \cdot D_1}{4} - \frac{D_1^2}{4}\right)$$

$$\frac{R}{4}(D_1^2 - d) = \frac{1}{4}(D^2 - D_1^2) \quad (\text{Multiplicando por 4 ambos miembros})$$

$$(RD_1^2 - Rd^2) = D^2 - D_1^2$$

$$D_1^2(R + 1) = D^2 + Rd^2$$

$$D_1 = \sqrt{\frac{D^2 + Rd^2}{R + 1}}$$

Para Caso 1 (Figura 10b)

$$a < b \rightarrow R = \frac{b}{a} > 1$$

$$\text{para } \begin{cases} a = 0,3 \\ b = 0,7 \end{cases}$$

$$R = \frac{b}{a} = \frac{0,7}{0,3} = 2,3333$$

Para R=2,3333

$$D_1 = \sqrt{\frac{D^2 + 2,3333 \cdot d^2}{2,3333 + 1}}$$

Si D = 6,5 mm y d = 3,2 mm, en ambos casos

Para Caso 1 (Figura 10b)

$$\begin{aligned} Di_1 &= 4,455 \text{ mm} \\ \delta_1 &= 0,627 \text{ mm} \\ \delta_2 &= 1,023 \text{ mm} \\ \delta_T &= 1,650 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_1 &= 7,542 \text{ mm}^2 \\ &17,59 \\ A_2 &= 8 \text{ mm}^2 \\ &25,14 \\ A_T &= 1 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Para Caso 2, (Figura 10c)

$$a > b \rightarrow R = \frac{b}{a} < 1$$

$$\text{para } \begin{cases} a = 0,7 \\ b = 0,3 \end{cases}$$

$$R = \frac{b}{a} = \frac{0,3}{0,7} = 0,4286$$

Para R=0,4286

$$D_1 = \sqrt{\frac{D^2 + 0,4286 \cdot d^2}{0,4286 + 1}}$$

Para Caso 2, (Figura 10c)

$$\begin{aligned} Di_2 &= 5,71 \text{ mm} \\ \delta_2 &= 1,257 \text{ mm} \\ \delta_1 &= 0,393 \text{ mm} \\ \delta_T &= 1,650 \text{ mm} \\ &17,59 \\ A_2 &= 8 \text{ mm}^2 \\ &7,542 \\ A_1 &= 2 \text{ mm}^2 \\ &25,14 \\ A_T &= 1 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

1.3. Consideraciones sobre la selección de los materiales

Los materiales empleados en la fabricación de electrodos constituyen mezclas de sistemas tetra-componentes compuestos por rocas minerales cubanas, fundamentalmente sistemas aluminosilicáticos de silicio, calcio, aluminio y magnesio, con adiciones de fluorita y rutilo, aglutinados con silicato de sodio (vidrio líquido) en proporciones de un hasta un 30 por ciento de éste último. Las ferroaleaciones

comúnmente empleadas para el recubrimiento de electrodos destinados al aporte de carburos a los depósitos realizados, están fundamentalmente compuestas de cromo y manganeso, entre otras.

El procedimiento de fabricación de los electrodos convencionalmente empleado es la extrusión, aunque también es empleada la inmersión. Este último no es de interés en el presente trabajo. Cuando se extruden las masas de recubrimientos para electrodos (conjugada con el empleo de materiales abrasivos) se realiza una relativa alta presión y se conduce a un proceso de desgarramiento superficial de los conductos y trefiles de las extrusoras, por lo cual el material tiene que ser muy resistente a la deformación y al desgaste.

Por otro lado, la adhesividad del silicato empleado como material aglutinante en las mezclas de recubrimiento para electrodos suele ser un problema al limpiar los canales y trefiles de las extrusoras.

Atendiendo a los aspectos antes referidos los materiales más comúnmente empleados en la fabricación de las extrusoras son aceros aleados, resistentes a las deformaciones, al desgaste abrasivo y a la corrosión por agua, esta última originada por los procesos de limpieza obligatorios después del uso de las máquinas.

Sin embargo, materiales económicos pueden ser empleados para la elaboración de dispositivos extrusores, cuando se trata de la prueba de dispositivos a escala de laboratorio, al estar sometidos a un régimen de explotación poco intensivo.

Teniendo en cuenta los aspectos de la sencillez para la elaboración por maquinado y el costo de la materia prima, se emplea en el presente trabajo un acero AISI, de bajo contenido de carbono y buena maquinabilidad, con un costo de adquisición en el mercado relativamente bajo.

1.4. Software de diseño para el dimensionamiento y la simulación de la extrusora

Existen diversos softwares de diseño para elementos mecánicos. Dentro de ellos, el *SolidWorks* se enseña y aplica en la carrera de ingeniería Mecánica, aprobado para ello por la Comisión Nacional de Carrera [11]. El *SolidWorks* es una herramienta de diseño de modelado sólido paramétrico basada en operaciones, que aprovecha la facilidad de

aprendizaje de la interfaz gráfica de usuario de *Windows*TM. El sistema permite crear modelos sólidos en 3D totalmente asociativos con o sin restricciones, mientras utiliza al mismo tiempo las relaciones automáticas o definidas por el usuario para capturar la intención del diseño [12].

La facilidad de uso de *SolidWorks* [13] combinada con la precisión y gran variedad de herramientas de análisis con elementos finitos, hacen del *SolidWorks Simulation*, la herramienta más fácil de implementar y generar resultados en un plazo relativamente corto.

Además de ello, el *SolidWorks Simulation Professional*, contiene las herramientas más importantes para realizar diversos tipos de pruebas para materiales lineales [12], tales como análisis térmicos, frecuencia, vibración, pandeo, fatiga, caída libre, optimización y análisis dinámico por eventos, obteniendo diversos resultados, a través de gráficos, valores puntuales, pruebas DOE (diseño de experimentos), etc.

Una de las aplicaciones más confiables del paquete de simulación del *SolidWorks* es la encargada de análisis estático [14].

1.5. Conclusiones parciales

1. De las extrusoras para la fabricación de electrodos revestidos, consultadas en la bibliografía, se recomienda atender al diseño de las que conducen a la obtención de recubrimientos de diferentes diámetros, aunque no sean simultáneamente. Dentro de los aspectos a considerar se encuentran la abrasividad y la viscosidad de las mezclas a tratar.
2. Dentro de las consideraciones dimensionales para el diseño deben tenerse en cuenta la factibilidad del cambio de trefiles, atendiendo a los distintos diámetros de los recubrimientos requeridos durante la investigación.
3. Los materiales comúnmente empleados para la fabricación de extrusoras destinadas a la elaboración de electrodos revestidos lo constituyen aceros aleados de alta resistencia e inoxidable. No obstante, para la elaboración de prototipos de extrusoras de laboratorio pueden seleccionarse materiales más económicos y de mejor maquinabilidad.
4. El *SolidWorks* es un software de diseño apropiado para el dimensionamiento y la simulación de extrusoras para la fabricación de electrodos revestidos.

Capítulo II: Construcción de la extrusora experimental

2.1. Diseño de la extrusora experimental

La extrusora, concebida para la elaboración de electrodos multicapas (Figura 10) cuenta con cuatro tipos de piezas diferentes, atendiendo a su forma geométrica característica, que son: Cuerpo (Figura 11), Trefiles de salida (Figura 12), Guías para el electrodo (Figura 13) y Pistón (Figura 14).

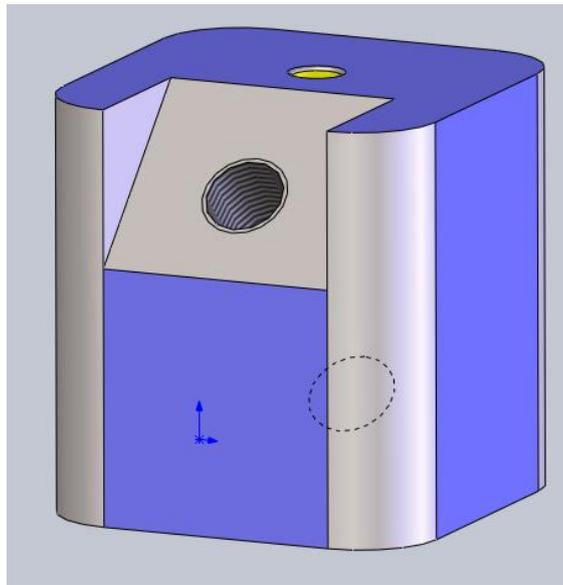


Figura 11: Cuerpo de la extrusora

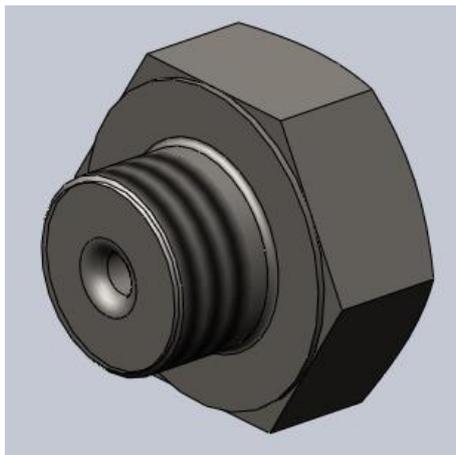


Figura 12: Trefiles de salida de la extrusora

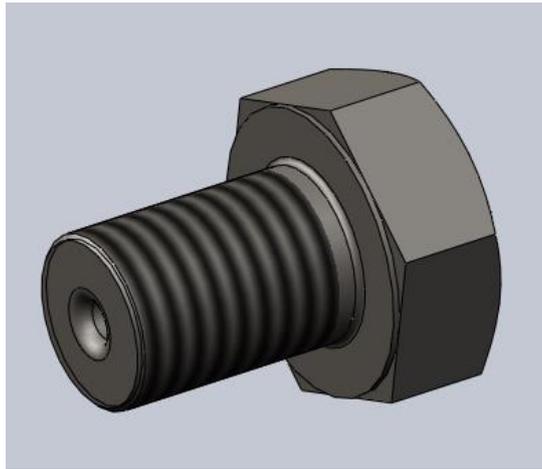


Figura 13: Guías para electrodo de la extrusora

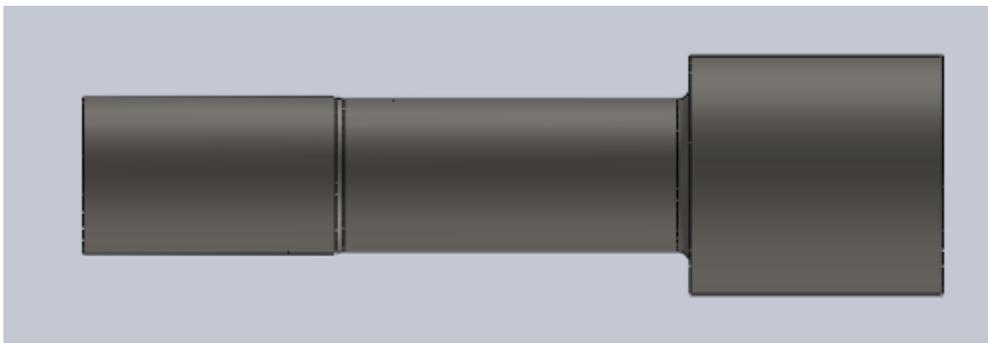


Figura 14: Pistón de la extrusora

El diseño se implementa empleando la plataforma gráfica del Software *SolidWorks* 2012, a partir de bocetos diferentes para cada parte (Figuras 1-4, del anexo) y un ensamble completo (Figura 5, del anexo).

Las diferencias entre los trefiles fueron asumidas, modificando fundamentalmente las aberturas, que diferenciaban a cada uno. De igual forma se procede para el diseño de las guías para los electrodos.

Los ajustes y tolerancias del pistón y el cuerpo (Anexo 1) se realizan considerando un ajuste deslizante en el sistema de agujero único.

2.2. Simulación de la extrusora experimental

Para la simulación se somete el cuerpo de la extrusora a $400 \text{ kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$ (Figura 15) en la zona de los agujeros del pistón y de la cavidad de conducción de la mezcla hacia el trefil, además de declarársele una sujeción del tipo fija en la parte de la base.

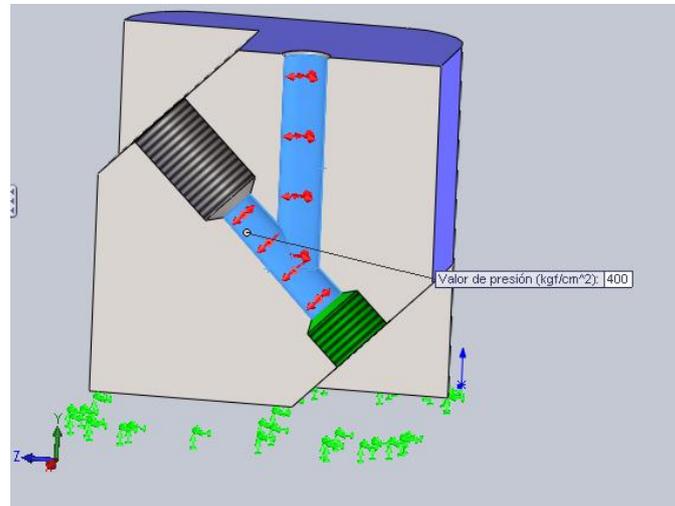


Figura 15: Aplicación de presión ($400 \text{ kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$) sobre el cuerpo

El mallado se realiza aplicando elementos triangulares (Figura 16), con tamaño $5,897 \text{ mm}$, 4 puntos Jacobianos y con una transición automática de $0,2447 \text{ mm}$ entre los elementos.

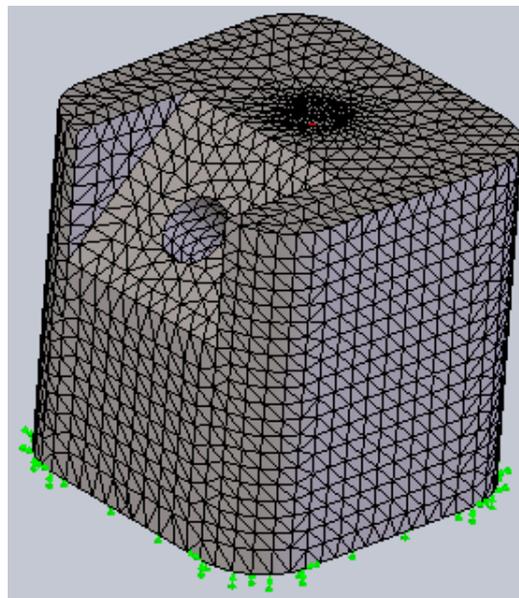


Figura 16: Mallado del cuerpo

La simulación muestra que el material no sobrepasa el límite elástico (Figura 17), con desplazamientos inferiores a los $2,7 \cdot 10^{-3}$ mm (Figura 18) y que la deformación unitaria máxima no sobrepasa los $4,38 \cdot 10^{-4}$ mm (Figura 19).

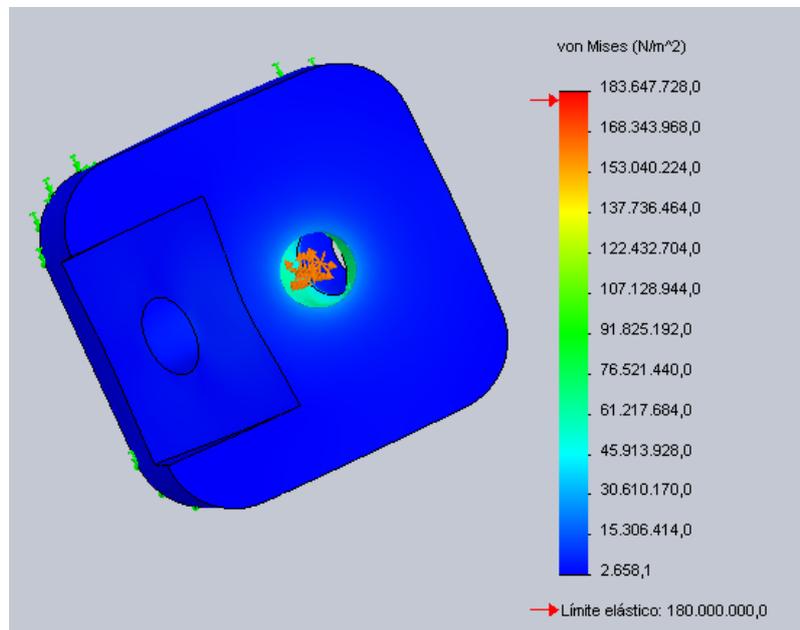


Figura 17: Tensiones residuales del cuerpo (Von-Mises)

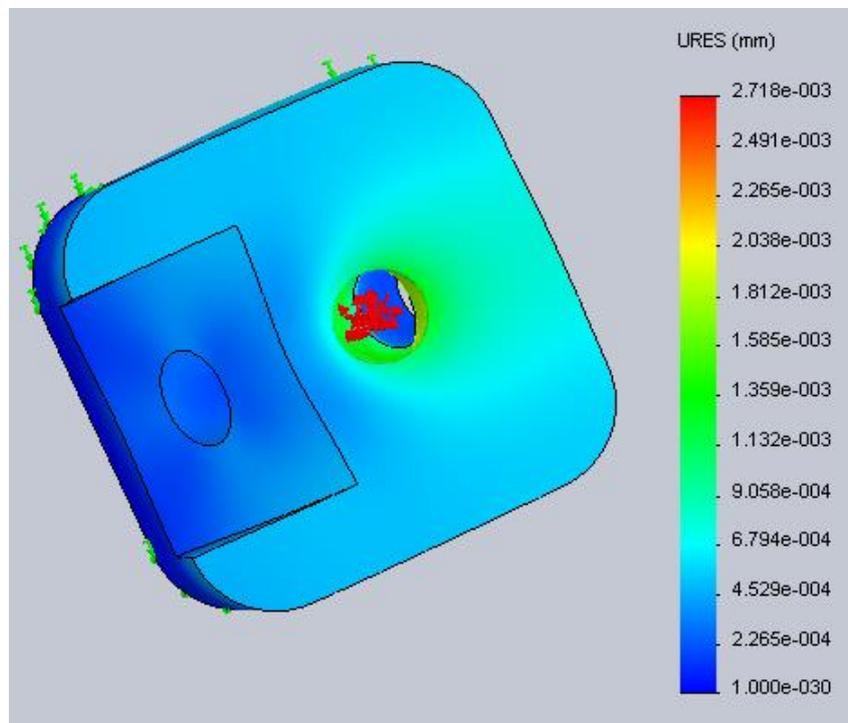


Figura 18: Desplazamientos del cuerpo

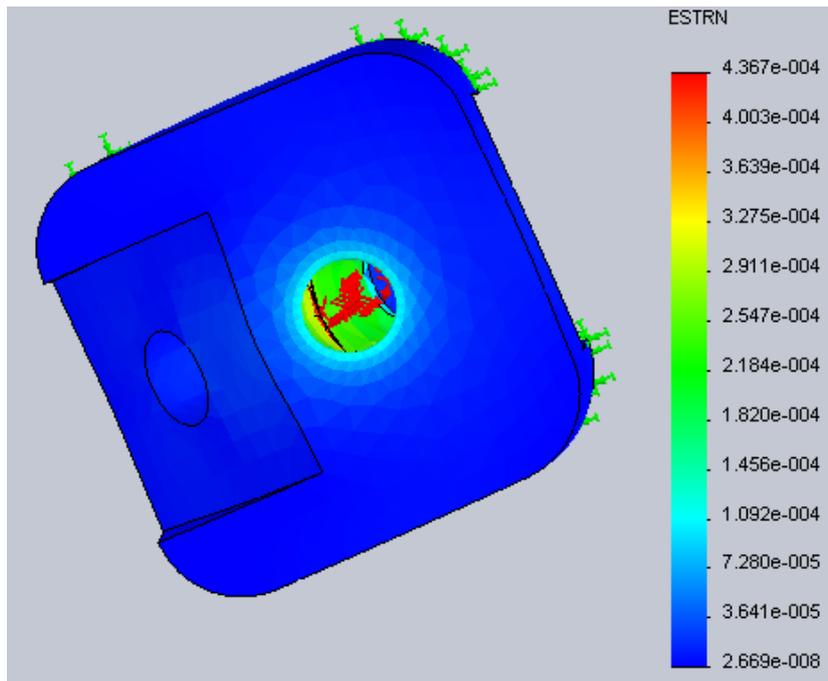


Figura 19: Deformaciones unitarias del cuerpo

De igual forma se obtiene la simulación para el trefil de diámetro 4,45 mm (Figura 12), con una carga de presión de $400 \text{ kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$ (Figura 20) y un mallado con elemento triangular de tamaño 1,9 mm (Figura 21).

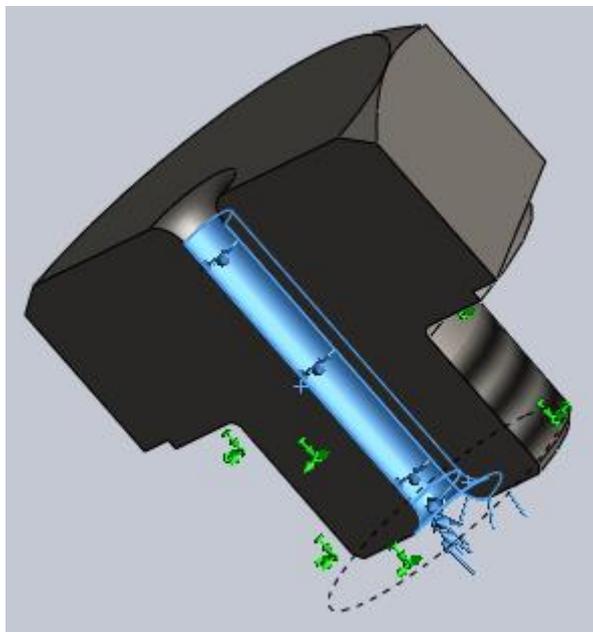


Figura 20: Aplicación de presión ($400 \text{ kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$) en el trefil

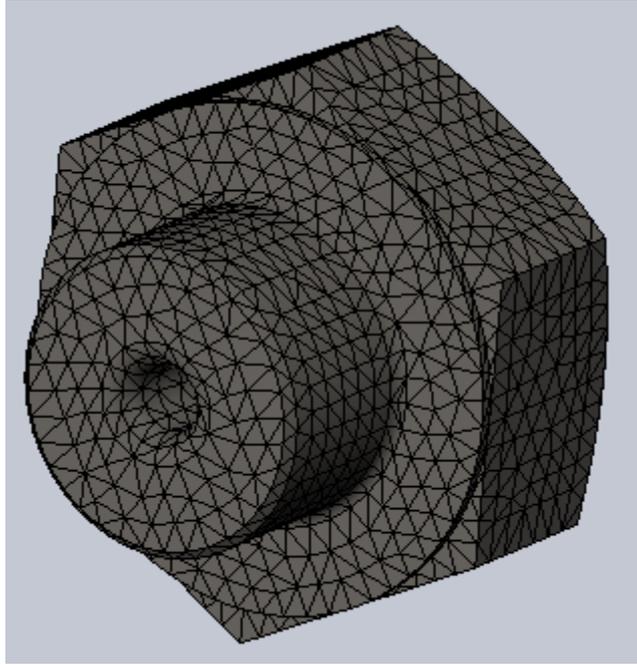


Figura 21: Mallado del trefil

El resultado de la simulación arroja que el trefil soporta dos veces y media la resistencia a la fluencia (Figura 22) del material seleccionado (Acero AISI 1010), con un desplazamiento inferior a $8,7 \cdot 10^{-4}$ mm (Figura 23) y con deformaciones unitarias inferiores a $2,4 \cdot 10^{-4}$ mm (Figura 24).

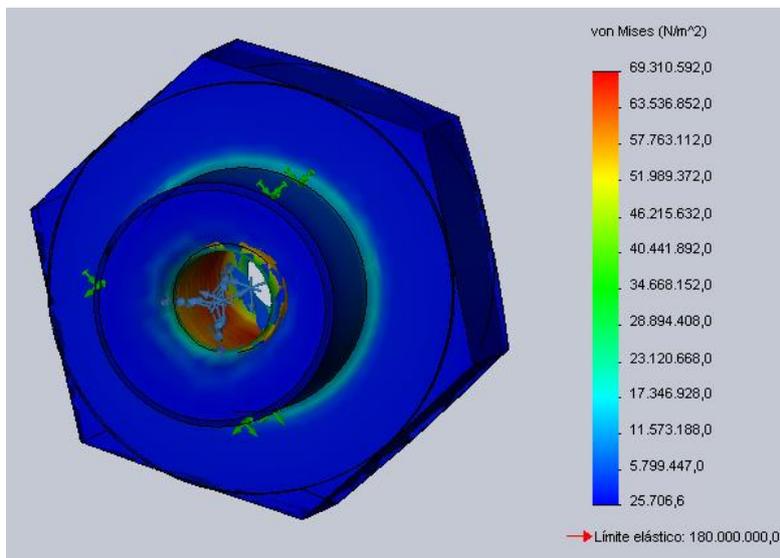


Figura 22: Tensiones residuales del trefil (Von-Mises)

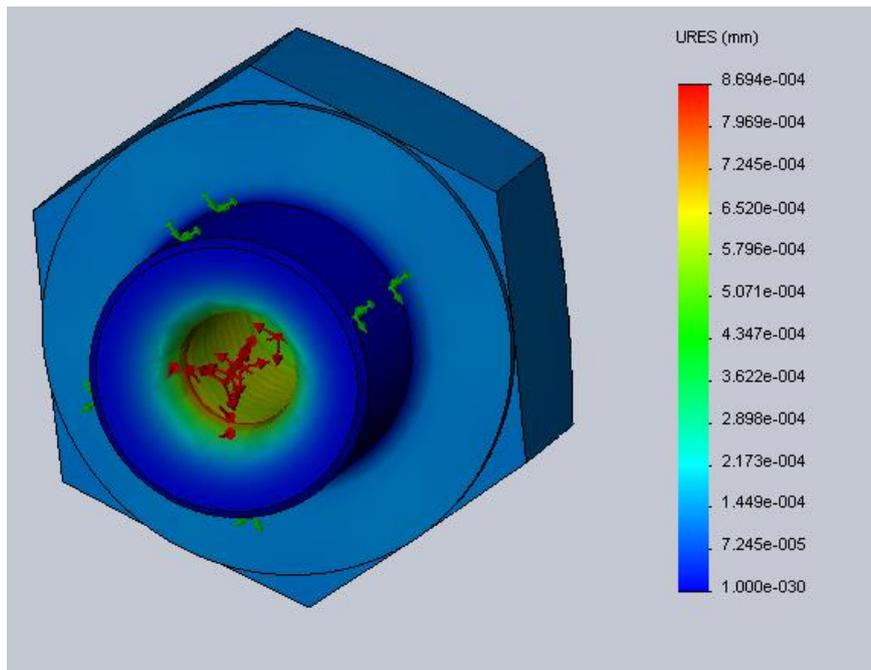


Figura 23: Desplazamientos del trefil

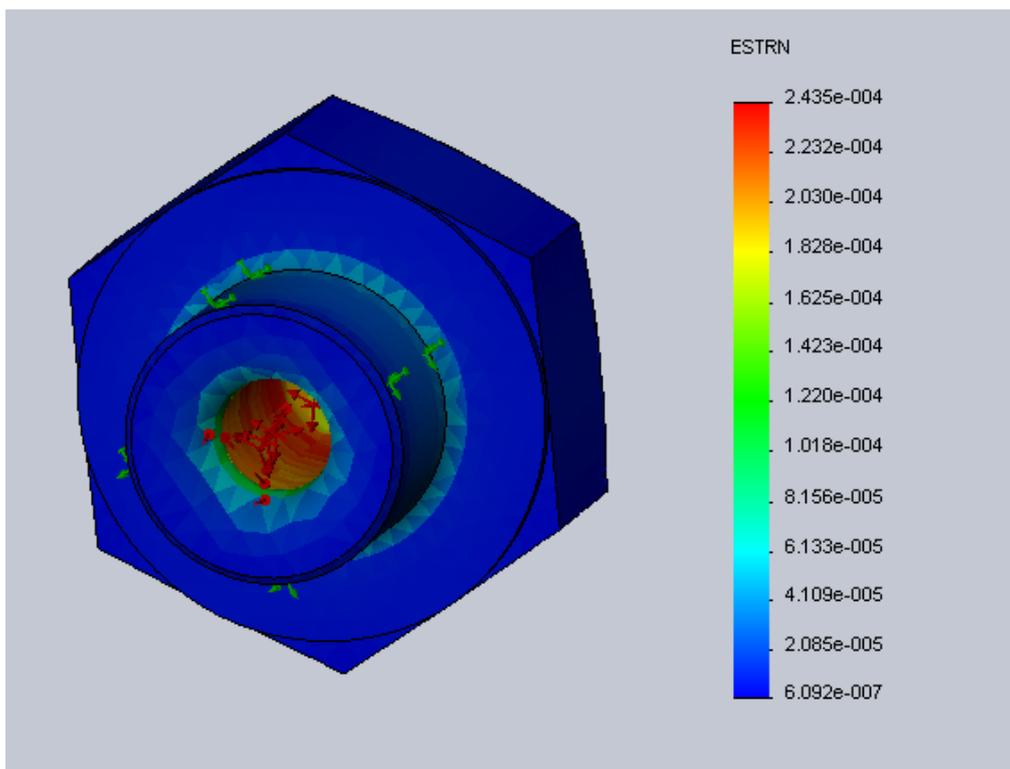


Figura 24: Deformaciones unitarias del trefil

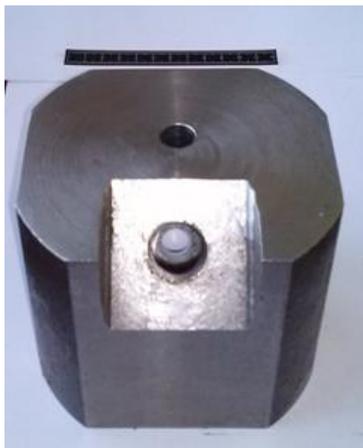
2.3. Construcción de la extrusora experimental

Dentro de las tareas desarrolladas para la construcción de este dispositivo, luego de contar con su diseño previo, se encuentran:

1. Fabricación del cuerpo;
2. Fabricación de los conductos de alineación o de entrada del electrodo;
3. Fabricación de los trefiles;
4. Fabricación del pistón.

Todas las piezas se fabricaron por el proceso de elaboración por maquinado (arranque de virutas) de semiproductos laminados de acero AISI 1010, en las operaciones de taladrado, fresado, cilindrado, refrentado y roscado, empleando diferentes máquinas herramientas, tales como: tornos y fresadoras universales y taladradoras verticales.

El cuerpo de la extrusora (Figura 25) se obtiene a partir de un laminado cilíndrico de 120 mm de diámetro y 105 mm de altura, el cual se caracteriza por una figura monolítica con tres aberturas, cuyo eje coincide en su interior, formando parte del plano lateral; dos de ellas roscadas, para alojar los conductos de alineación de electrodo y los trefiles, permitiendo su intercambiabilidad. El tercer agujero es liso, con un adecuado acabado superficial, y permite un ajuste deslizante del pistón con la camisa del cuerpo (Figura 26). Los laterales se maquinan para lograr el agarre necesario para la elaboración de los agujeros, fresar las esquinas y la disminución del peso.



a)



b)

Figura 25: Cuerpo de la extrusora



Figura 26: pistón para la compresión de la mezcla

Los conductos de alineación de los electrodos (Figura 27) y los trefiles (Figura 28) se obtienen a partir de laminados hexagonales, para eliminar el proceso complejo de confección de las cabezas para su apriete.



Figura 27: Conductos para la alineación de los electrodos



Figura 28: Trefiles para la colocación del recubrimiento al núcleo de los electrodos

El ensamble completo del dispositivo (Figura 29) permite la operación de recubrimiento de electrodos revestidos mediante la compresión de la masa, tal cual ocurre en procesos industriales, pero empleando una ínfima cantidad de mezcla.



Figura 29: Ensamble completo del dispositivo de extrusión de electrodos

2.4. Conclusiones parciales

1. La extrusora cuenta con cuatro tipos de piezas diferentes, atendiendo a su forma geométrica característica: Cuerpo, tres trefiles de salida (4,45 mm, 5,71 mm y 6,5 mm), tres guías para electrodo (3,2 mm; 4,45 mm y 5,71 mm) y un pistón.
2. El diseño y la simulación se implementan empleando la plataforma gráfica del software *SolidWorks* 2012. Para la simulación se somete el cuerpo de la extrusora a $400 \text{ kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$, en la zona de los agujeros del pistón y de la cavidad de conducción de la mezcla hacia el trefil, además de declarársele una sujeción del tipo fija en la parte de la base. El mallado se realiza aplicando elementos triangulares con tamaño 5,897 mm. La simulación muestra que el material no sobrepasa el límite elástico, con desplazamientos inferiores a los $2,7\cdot 10^{-3}$ mm y la deformación unitaria máxima no sobrepasa los $4,38\cdot 10^{-4}$ mm.
3. Para la simulación del trefil de diámetro 4,45 mm se realiza, con una carga de presión de $400 \text{ kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$ y un mallado con elemento triangular de tamaño 1,9 mm. El resultado de la simulación arroja que el trefil soporta dos veces y media la resistencia a la fluencia del acero AISI 1010, con un desplazamiento inferior a $8,7\cdot 10^{-4}$ mm y las deformaciones unitarias inferiores a $2,4\cdot 10^{-4}$ mm.
4. Todas las piezas se fabricaron por el proceso de elaboración por maquinado de semiproductos laminados de acero AISI 1010, en las operaciones de taladrado, fresado, cilindrado, refrentado y roscado. El cuerpo de la extrusora se obtiene a partir de un laminado cilíndrico de 120 mm de diámetro y 105 mm de altura, el cual se caracteriza por una figura monolítica con tres aberturas, cuyo eje coincide en su interior, formando parte del plano lateral; dos de ellas roscadas, para alojar los conductos de alineación de electrodo y los trefiles, permitiendo su intercambiabilidad.

Capítulo III: Evaluación de la extrusora experimental

3.1. Aplicación de la extrusora experimental

Para la evaluación del dispositivo se fabricaron tres prototipos de electrodos, considerando las relaciones geométricas de posicionamiento de los recubrimientos sobre el alma de los electrodos (Figura 10).

3.1.1. Fabricación de los electrodos

El proceso de fabricación de electrodos contó de cuatro etapas fundamentales; a saber:

- a) Selección de las materias primas;
- b) Preparación de las materias primas;
- c) Fabricación de los electrodos;
- d) Control de la calidad de los electrodos.

- a) Selección de las materias primas

La producción en masa de electrodos para soldadura se realizó por extrusión, tal cual se ha descrito durante la construcción del dispositivo.

El alambre constituye el alma del electrodo y se empleó para ello un acero AISI 1010, de diámetro 3,2 mm y 300 mm de longitud.

Los componentes del revestimiento se conformaron con una mezcla de ferroaleaciones y minerales, aglutinados con silicatos hidratados de sodio o potasio, solubles en agua [15]. En la fabricación del revestimiento de los electrodos se suelen utilizar hasta cuarenta minerales y sustancias distintas. En el caso del electrodo E6013, está formado por un grupo de compuestos químicos (Tabla 1), obtenidos de la combinación de ciertas materias primas (Tabla 2).

Tabla 1. Composición química de óxidos correspondientes al electrodo E6013 [16]

Tipo de composición	6013
TiO ₂	52,4
SiO ₂	17,6
ZrO ₂	0,29
Al ₂ O ₃	0,20
MnO	8,0
K ₂ O	4,3
FeO	6,1
CaO	11,3

Tabla 2: Materias primas para la obtención del recubrimiento E6013 [17]

Materiales del Revestimiento	6013
Piedra Caliza y/o Carbonato de Calcio	<10
Magnesita (polvo total inhalable)	<5
Óxidos de Hierro (como Fe)	<10
Fluoruros Inorgánicos (como F)	<10
Polvo Hierro	<10
Manganeso y componentes inorgánicos (como Mn)	5-15
Silicatos aglomerantes	<5
Mica	<20
Cuarzo/sílice Cristalino	<15
Caolín	<20
Otros Silicatos minerales	5-30

La ferroaleación empleada para la elaboración de los electrodos (Tabla 3) es obtenida del proceso de reducción aluminotermia.

Tabla 3: Composición química (%) de la ferroaleación [18]

Ferroaleación											
Mn	Cr	C	Fe	S	P	Mg	Al	Si	V	Co	Ni
51,0	14,4	0,39	12,9	0,02	0,04	0,1	1,2	2,2	0,10	0,16	0,2

b) Preparación de las materias primas

El alambre desnudo se lija y se le desprende el óxido adherido durante su transportación y almacenamiento. A esta etapa se le denomina decapado mecánico.

Cada componente del recubrimiento se trituro y cribó, hasta conseguir la granulometría adecuada.

c) Fabricación de los electrodos

Al ser la fabricación de electrodos un proceso complejo, los extremos de cada alma se sometieron a un proceso de eliminación de las rebabas producidas por el corte con muela de esmeril. A continuación se desengrasaron mediante un lavado con agua y polvo de jabón. Posteriormente se procedió a su enderezado.

Se seleccionó cada componente, se trituró y cribó, hasta conseguir la granulometría adecuada. Luego, se dosificaron y homogenizó la masa, a partir de varias cantidades específicas para cada material, que confluyeron a un recipiente único. La homogenización de la composición se logró por medio de mezcladores rotatorios; de aquí el material se llevó a la extrusora.

El recubrimiento se adhirió al alma metálica mediante el empleo de silicato hidratado de sodio, soluble en agua, para aglutinar la mezcla seca y darle consistencia. Una vez obtenida la mezcla húmeda se vertió en una prensa en donde penetró la varilla por un lado, saliendo recubierta en toda su longitud por el lado opuesto.

d) Control de la calidad de los electrodos

Dentro de los pasos requeridos para un adecuado control de la calidad de los electrodos se encuentran:

La comprobación de la composición del alambre, a partir del análisis químico de un despunte de la varilla.

La realización de un análisis individualizado de la calidad y composición de cada uno de las materias primas que conformarán el recubrimiento del electrodo.

La realización de un proceso de control de la homogeneidad de la mezcla del recubrimiento para cada una de las variantes.

La comprobación de la excentricidad del recubrimiento y el cepillado de ambos extremos de la varilla revestida. Uno, para el ajuste de la pinza portaelectrodos y el otro, para facilitar el cebado de arco. Los electrodos se marcan con la identificación del punto experimental estudiado.

3.1.2. *Modificaciones de la extrusora*

Durante el desarrollo de pruebas preliminares se constató que la deposición del recubrimiento sobre la superficie de los núcleos era consistente; sin embargo, la masa adherida no mantenía un perfil concéntrico.

Este defecto es inaccesible en los electrodos para la soldadura con proceso SMAW, considerando que trae consigo una débil protección del arco y su desvío, aspectos que contribuyen a deteriorar la apariencia del cordón y las propiedades químicas y mecánicas de las uniones soldadas.

Haciendo un estudio del funcionamiento de la extrusora, se constata que la forma de fabricación de los trefiles conducía a la desalineación de los conductos para la alineación del núcleo (Figura 27) y los trefiles para la colocación del recubrimiento (Figura 28). La causa de esta desalineación no se previó en el diseño preliminar de la extrusora, por lo que se requiere reconcebir su estructuración.

Para ello, se propone dejar como están los conductos para la alineación del núcleo (Figura 3) y modificar los trefiles para la colocación del recubrimiento (Figura 30).



Figura 30: Nuevo prototipo de trefil autocentrante (ver plano del anexo 2)

El cuerpo (1) del trefil (Figura 30) se concibe con una sección (2), que contribuye a la alineación del núcleo, seguido de otra (3), para la alimentación de la masa, y una última (4), que garantiza el diámetro del recubrimiento.

Al elaborarse por taladrado, en una sola colocación, el agujero para la alineación del núcleo (2) y el que garantiza el diámetro del electrodo (4), se logra la coaxialidad entre sus dos ejes imaginarios, y, por tanto, entre las superficies exteriores que centran el núcleo y el recubrimiento del electrodo.

Adicionalmente, se le incorpora un dispositivo (Figura 31) para la alimentación gradual del núcleo, el cual consiste en un mecanismo de tuerca y tornillo, que se fija mediante soldadura manual con electrodo revestido [19] al cuerpo de la extrusora (Figura 25).



Figura 31: Dispositivo para la alimentación del núcleo del electrodo

3.1.3. Procedimiento de uso

1. Colocar el conducto para la alineación del núcleo (Figura 27) al cuerpo de la extrusora (Figura 25).
2. Colocar el trefil de salida del recubrimiento (Figura 30) al cuerpo de la extrusora (Figura 25).
3. Colocar el dispositivo para la alimentación del núcleo (Figura 31) al cuerpo de la extrusora (Figura 25), pero sin el tornillo.
4. Introducir la masa del recubrimiento dentro del alojamiento del pistón en el cuerpo de la extrusora (Figura 25).
5. Apisonar debidamente la masa para recubrimiento mediante un pisón más fino, que el diámetro del pistón (Figura 26). Esta operación se realiza para eliminar discontinuidades en la masa.

6. Colocar el electrodo dentro de la extrusora (Figura 25), a través del conducto de alineación del núcleo (Figura 25).
7. Colocar el tornillo del dispositivo para la alimentación del núcleo del electrodo (Figura 31).
8. Colocar el pistón (Figura 26) dentro de la cavidad de la mezcla en el cuerpo de la extrusora (Figura 25).
9. Colocar la extrusora completa, entre su base y la cabeza del pistón, en el interior de un mecanismo de apriete (prensa o tornillo de banco).
10. Comenzar a presionar el pistón (Figura 26) y a rotar, simultáneamente, el tornillo del mecanismo de alimentación del alma del electrodo (Figura 31), tal que sus movimientos relativos se mantengan proporcionales para garantizar un adecuado proceso de recubrimiento.

3.1.4. Ensayos realizados

- *Fabricación de los electrodos:*

Tal como se planteó anteriormente, se fabricaron las siguientes variantes de electrodos:

La primera capa de extrusión para la variante 2 se deposita con un trefil de diámetro 4,5 mm (Figura 33). Igualmente la variante 3 es obtenida con un trefil para la capa interna de diámetro de 5,8 mm (Figura 34). Para las capas externas de las variantes 2 y 3, así como para la capa de recubrimiento único del electrodo de la variante 1 (Figura 32c) se emplea un trefil de diámetro 6,5 mm.



Figura 32: Variante 1. Capa de recubrimiento único del electrodo se emplea un trefil de diámetro 6,5 mm



Figura 33: Variante 2. Primera capa depositada con un trefil de diámetro 4,45 mm



Figura 34: Variante 3. Primera capa depositada con un trefil de diámetro 5,71 mm

Luego de la aplicación de la primera capa, el recubrimiento de los electrodos debe ser revisado y se requiere que sean eliminados los excedentes de rebabas o sobrantes de recubrimiento, que pudieran originarse del proceso de extrusión, tal que puedan introducirse adecuadamente en los conductos de alimentación del próximo proceso de extrusión [1].

La deposición de la segunda capa, en las variantes 2 y 3, se realiza después de que la primera fuera sometida a un proceso de secado al aire (dos días) seguido de uno de calcinación, hasta 130 °C, durante 2 horas. Con este procedimiento se evita el agrietamiento de los recubrimientos y se les da la consistencia requerida para los procesos de extrusión de sus respectivas segundas capas (Figura 35). Para el caso de la variante 1, el electrodo queda terminado con este proceso de calcinado.



a) Todos terminados



b) Electrodo con ferroaleaciones internas



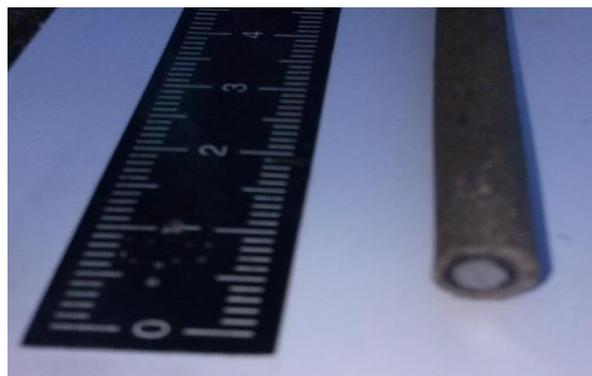
c) Electrodo con ferroaleaciones externas

Figura 35: Electrodo terminados

Las variantes 2 y 3 se obtienen por extrusión y de forma similar se someten a los procesos de secado y calcinación anteriormente referidos. Para todas las variantes, se trata de obtener la coaxialidad requerida entre las capas y el núcleo de los electrodos (Figura 36).



- a) Ambos tipos de electrodos. Obsérvese el perfil de colores en la sección del diámetro y en la capa superficial



- b) Electrodo con ferroaleaciones internas. Obsérvese el color oscuro (dado por el grafito) de las ferroaleaciones adheridas al núcleo



- c) Electrodo con ferroaleaciones externas. Obsérvese el color oscuro (dado por el grafito) de las ferroaleaciones en la parte exterior del recubrimiento



d) Electrodo con recubrimiento homogéneo

Figura 36: Electrodo terminado. Vista frontal

- ***Prueba de los electrodos***

Los electrodos se emplean en un proceso de deposición sobre una placa de acero AISI 1010 [20], con corriente alterna obtenida de un transformador monofásico de 220 V en el devanado primario.

Para ello, se emplea un sistema de adquisición de datos (Figura 37), compuesto por el circuito de soldadura, un *shunt* de 75 mA y un osciloscopio digital DS1000C, CAL / CML Series, con 25MHz, 500MSa/s y 2 canales.

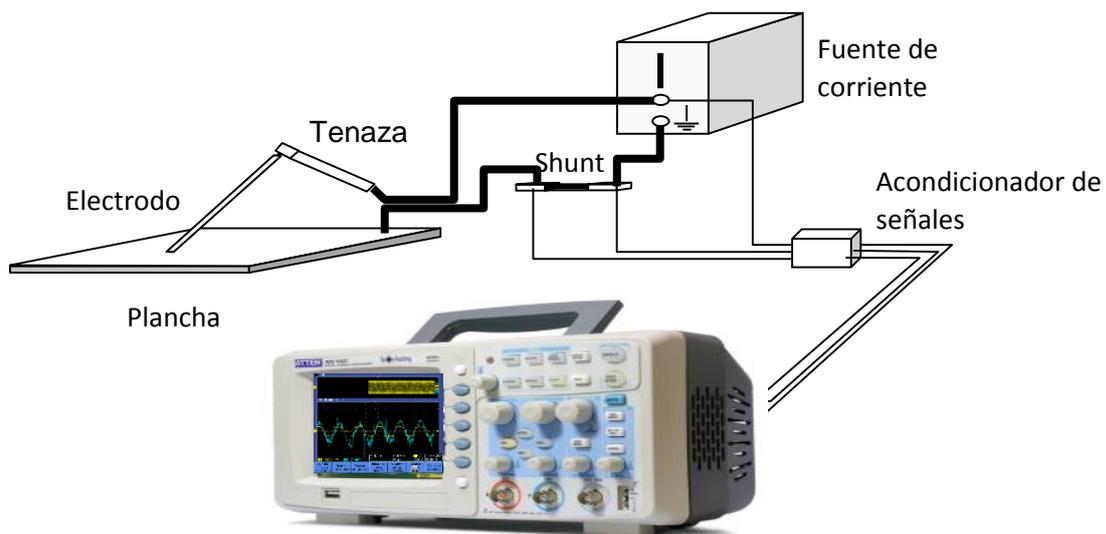


Figura 37: Sistema para la adquisición de las señales del arco eléctrico de soldadura

Las datos fueron adquiridas en un fichero con extensión csv y procesadas con *MatLab* 7.10.0 R2010A, empleando un código para el acondicionamiento de la data experimental (Anexo 3). Las imágenes de las ondas de corriente y tensión preliminares (Figura 38) muestran ligeras diferencias en su comportamiento.

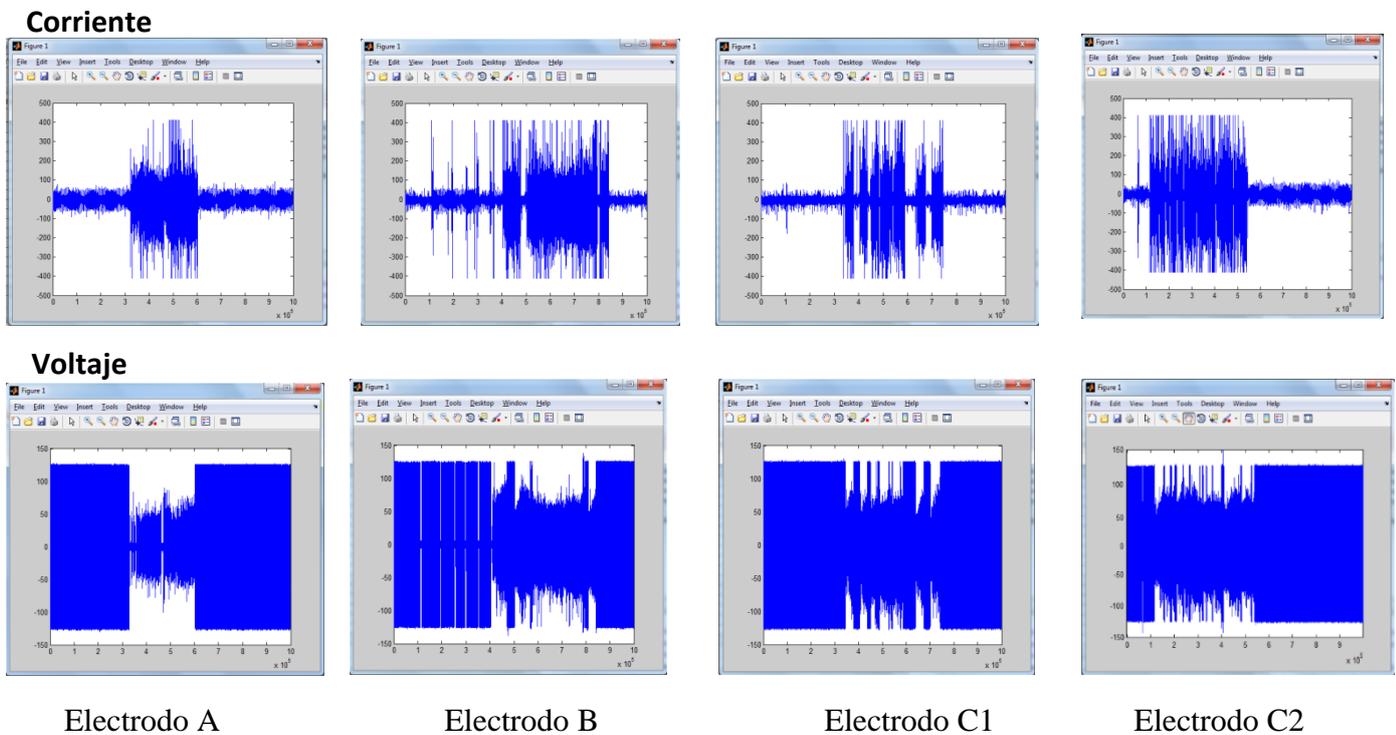


Figura 38: Oscilogramas de corriente y tensión de los electrodos estudiados

3.2. Ventajas económicas de la extrusora experimental construida

La extrusora experimental construida garantiza una operación de recubrimiento multicapa y concéntrico de núcleos de acero macizo para la fabricación de electrodos destinados al proceso SMAW, con un consumo mínimo de material, por lo que cumple la condición para la cual fue diseñada.

Cuando se trabajan diseños experimentales donde se requiere variar la composición de los recubrimientos, fundamentalmente de ferroaleaciones, que tienen un costo relativamente alto, esta variante permite economizar los gastos por conceptos de materias primas.

Por otra parte, el tratamiento y preparación de las ferroaleaciones, generalmente muy duras, se dificulta cuando los volúmenes de materiales a trabajar son altos. Este y el

aspecto relacionado con el deterioro del equipamiento de molienda y procesamiento de áridos, empleados para la fabricación de materiales para soldar, hacen del dispositivo una variante económica para la investigación de nuevas formulaciones.

En los costos de elaboración de una pieza mediante el proceso de maquinado, intervienen varios elementos como son:

- Costo de las herramientas de corte.
- Amortización de la inversión de las máquinas herramientas.
- Costo de los materiales utilizados en la elaboración de la pieza.
- Costo de los dispositivos, accesorios e instrumentos de medición utilizados en el proceso de elaboración de la pieza.
- Gastos en salarios de los operadores que trabajan directamente en la elaboración de la pieza.
- Gastos indirectos (salario del personal administrativo, técnico y de dirección)
- Otros gastos (energía eléctrica, combustibles, lubricantes, etc.).

Entre los aspectos que se relacionan existen algunos los cuales en ocasiones resulta complejo determinar. No obstante la determinación de un costo al menos aproximado es importante siempre que se lleve a cabo un proceso de maquinado de una pieza.

A continuación se realiza un análisis sobre las implicaciones de tipo económica que cada uno de los elementos antes mencionados y que tienen una implicación en la formación del costo final que tendrá la pieza a elaborar.

Herramientas de corte.

La adecuada selección de la herramienta de corte implica un mejor efecto económico en el costo final de la pieza, aquí es importante tener en cuenta el tipo de material de la herramienta.

Máquinas herramientas.

Con las máquinas herramientas sucede algo similar que lo citado anteriormente para el caso de las herramientas de corte, pues si estas no son adecuadamente seleccionadas, se estará aumentando sin necesidad alguna, el costo final de la pieza.

Dispositivos, accesorios e instrumentos de medición.

La utilización de dispositivos y accesorios que faciliten el trabajo, aumenten la seguridad de su realización y disminuyan los tiempos de ejecución de estos, resulta un aspecto de gran importancia en la elaboración de piezas por maquinado, lo cual contribuye a un aumento de la productividad y por ende a la disminución de los costos de producción, siempre y cuando se empleen los dispositivos, accesorios e instrumentos de medición adecuados.

Salarios de los operadores

El salario de los operadores está en función de su calificación y esta a su vez de su preparación y capacidad de ejecutar trabajos con una mayor o menor complejidad, devengando un mayor salario cuanto mejor sea la calificación del operario.

Gastos indirectos

Los gastos indirectos se derivan de los salarios del personal administrativo, técnico y de dirección, vinculados a los talleres de maquinado en este caso, además de otros gastos como pueden ser los de corriente eléctrica, medios de protección e higiene, etc.

Cálculo aproximado del costo económico de maquinado de la pieza.

A continuación se determinan el costo económico aproximado del dispositivo fabricado utilizando una herramienta de cálculo de una empresa del SIME, en Santa Clara. Este procedimiento que se ha explicado puede ser objeto de determinadas críticas, por imprecisiones, omisiones, etc., pero es al menos un procedimiento establecido. Hay empresas donde no existen estos procedimientos y los cálculos de este tipo se hacen de una manera muy irracional.

Este procedimiento consiste en una hoja Excel que hace automáticamente los cálculos tomando como base los tiempos de fabricación. El tiempo total de fabricación de una pieza incluye el tiempo principal de maquinado y otros tiempos. Dentro de estos últimos hay una variedad apreciable: tiempo preparativo-conclusivo, tiempo auxiliar, tiempo de servicio al puesto de trabajo, tiempo de descanso y necesidades personales, etc.

En la hoja de cálculo (Tabla 4) que se toma como ejemplo utiliza como dato de entrada el peso del material empleado para la fabricación de la pieza:

Tabla 4: Hoja de cálculo de materias primas

COSTEO Pag 3						
DESGLOSE DE GASTOS DIRECTOS DE MATERIAS PRIMAS						
Descripción	U.M	Cant	\$ USD/Unid	\$ MN/Unid	Totales CUC	Totales CUP
Acero	Kg	0	\$4.10	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Bronce	Kg	0	\$6.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Aluminio	Kg	0	\$4.25	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Laton	Kg	0	\$3.74	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Hierro Fund	Kg	0	\$1.16	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Hilo de erosion	Kg	0	\$4.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Cobre	Kg	0	\$6.04	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Columnas	U	0	\$5.43	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Bujes	U	0	\$1.38	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Expulsores	U	0	\$1.10	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Tornillos	U	0	\$0.36	\$0.00	\$0.00	\$0.00

El peso de la pieza se pone en la columna “Cant”, y se da en kilogramos (kg). En la columna “\$USD/Unid” se puede ver el precio del kilogramo del material de la pieza, por ejemplo, si es acero se considera un promedio de \$ 4.10. Desde luego, el precio del kg de los distintos materiales cambia cada cierto tiempo, por lo que un cálculo preciso requiere de la actualización constante de esta columna de la hoja de cálculo.

La página 2 de la hoja de cálculo abarca los siguientes datos:

Tabla 5: Hoja de cálculo de gastos en tiempo, salario y energía

Costeo Pag 2							
DESGLOSE DE LOS GASTOS DE TIEMPO, SALARIO y ENERGIA							
PROYECTO	T(Minutos)	T(Horas)	Horas	Cosumo Horario	KW-H Consumido	Tarifa	Valor
Diseño	0	0	0.00	0.00	0.00	15	\$0.00
Tecnología	0	0	0.00	0.00	0.00	10	\$0.00
Dibujo	0	0	0.00	0.00	0.00	8	\$0.00
FRABRICACION	T(Minutos)	T(Horas)	Horas	Cosumo Horario	KW-H Consumido	Tarifas	G.Sal
Corte		0.00	0.00	1.50	0.00	0.89	\$0.00
Torno	0.00	0.00	0.00	9.05	0.00	1.46	\$0.00
Fresa	0.00	0.00	0.00	10.64	0.00	1.46	\$0.00
Rectificadora	0.00	0.00	0.00	12.59	0.00	1.46	\$0.00
Afiladora	0.00	0.00	0.00	2.00	0.00	1.46	\$0.00
Mandrinadora	0.00	0.00	0.00	13.00	0.00	1.46	\$0.00
Tal Coodenada	0.00	0.00	0.00	4.25	0.00	1.46	\$0.00
Cepillo	0.00	0.00	0.00	67.50	0.00	1.46	\$0.00
Recortador	0.00	0.00	0.00	7.50	0.00	1.46	\$0.00
Mortajadora	0.00	0.00	0.00	5.40	0.00	1.46	\$0.00
Centro de Maquinado	0.00	0.00	0.00	27.00	0.00	1.60	\$0.00
Centro de Erosión	0.00	0.00	0.00	17.00	0.00	1.60	\$0.00

El tecnólogo debe llenar la columna que dice “T (Minutos)”. Se incluyen los costos de la proyección de la pieza (el diseño), de la elaboración de la tecnología de fabricación y del dibujo de la pieza. En la columna “Tarifa” aparece el promedio del costo por hora de trabajo en el diseño de la pieza, en la elaboración de la tecnología y en el dibujo. De esta manera, cuando se introduce la cantidad de minutos dedicados a cada uno de estos

procesos la hoja calcula automáticamente el costo. En un centro de trabajo con un control adecuado de lo que hace, hay personal dedicado a medir estos tiempos reales. En otros casos se asumen por aproximación y experiencia, lo cual es lo menos recomendable. Se va a considerar en este caso que el tiempo de diseño es cero porque el objetivo principal en el cálculo de este costo es el del proceso de maquinado.

Seguidamente la hoja de cálculo se dedica a los tiempos de fabricación y sus costos. Nótese que aparecen diferentes operaciones de maquinado en la primera columna. El usuario debe introducir en la segunda columna la cantidad de minutos que la pieza requiere para cada operación.

La hoja de cálculo llena automáticamente la hoja siguiente, para lo cual utiliza todos los datos introducidos anteriormente dando como resultado el costo económico de la pieza:

Tabla 6: Resultados de costos

"UEB SERVICIOS INDUSTRIALES"						
"ANEXO DE CONTRATO"		PREFACTURA				
DATOS DEL CLIENTE						
CLIENTE		CIUDAD	Santa Clara			
CODIGO		TELEFONO				
CONTACTO		CORREO				
CARGO		FAX				
DIRECCION						
DATOS DEL SUMINISTRADOR						
UEB "SERVICIOS INDUSTRIALES"						
DIRECCION						
TELEFONO						
DESCRIPCION, CANTIDAD Y PRECIO						
	Cant	Precio CUC	Precio CUP	Importe:CUC	Importe:CUP	Importe T
Construccion	8	\$37.49	\$4.35	\$37.49	\$4.35	\$41.84
Proyecto	1	\$0.00	\$5.33	\$0.00	\$5.33	\$5.33
				\$37.49	\$9.68	\$47.18

3.3. Conclusiones parciales

1. Para el proceso de extrusión se rediseñaron y construyeron nuevos trefiles, en cuya parte delantera poseen una guía para el núcleo del electrodo, con formas y dimensiones que garantizan un proceso de extrusión de capas superpuestas (doble recubrimiento) y con la concentricidad requerida.
2. El rediseño de la extrusora experimental condiciona el mínimo de material necesario para la experimentación.
3. La metodología de empleo de la extrusora modificada y el procedimiento para el recubrimiento de electrodos de doble capa permite sincronizar la velocidad de avance del pistón y del mecanismo de alimentación del núcleo del electrodo, logrando capas uniformes de recubrimiento alrededor del mismo.
4. El proceso de uso de la extrusora permitió fabricar electrodos que pudieron ser probados con el procedimiento manual de soldadura.
5. La variante de extrusora fabricada permite el ahorro de materia prima, recursos y tiempo durante la fabricación de nuevas composiciones de electrodos.

Conclusiones Generales

1. La extrusora construida está compuesta por un cuerpo, que alberga tres trefiles de salida, tres guías para electrodo (todos intercambiables), un pistón y un mecanismo de alimentación del electrodo, fabricados de acero AISI 1010.
2. El diseño de la extrusora experimental para la fabricación de electrodos, en las variantes de una y dos capas, coadyuva a un consumo mínimo de revestimiento durante el proceso.
3. La rigidez del cuerpo y trefiles de la extrusora garantiza la correspondencia entre los diámetros de los recubrimientos de los electrodos fabricados, respecto a los preestablecidos en su concepción.
4. La guía solidaria incorporada en la parte delantera de los trefiles contribuye a un proceso de extrusión con la concentricidad requerida entre las capas superpuestas y el núcleo de los electrodos.
5. Los electrodos fabricados responden adecuadamente durante el proceso de soldadura manual al que fueron sometidos, pudiéndose constatar que su fabricación fue satisfactoria.

Recomendaciones

1. Terminar el estudio de soldadura con los electrodos elaborados, tal que pueda evaluarse la calidad de los mismos.
2. Modificar el mecanismo de alimentación del electrodo para permitir el recubrimiento de electrodos en su total longitud.
3. Valorar el cambio de material de la extrusora y los trefiles a un acero inoxidable.
4. Valorar un mecanismo de sincronización entre el avance del pistón y la alimentación del electrodo.

Referencias

1. Gómez-Pérez, C. R., González-Cabrera, Odonel, Quintana-Pucholrafael; Perdomo-González, Lorenzo, Cruz-Crespo, Amado; Miguel-Oria, Jorge V. "Comparación entre las copas de electrodos simple y doblemente recubiertos". En: *Conferencia Internacional de Ingeniería Mecánica VII COMEC*. Santa Clara, Cuba. Feijóo. 5-8/nov 2012. p. 11. ISBN 978-959-250-757-9. [Consultado el: nov/2012].
2. Rodríguez-Pérez, M. *Electrodo tubular revestido para el relleno superficial de centralizadores, estabilizadores y piezas sometidas a condiciones de desgaste similares, Tesis Doctoral, UCLV, Santa Clara, Cuba, 1992.*
3. A., Q.-B. "Medida de porosidade de soldas subacuáticas". En: *XXXII CONSOLDA. Congreso Nacional de Soldagem*. Belo Horizonte, Brasil: 2006.
4. López-Fontanills, R. L. *Comparación entre Electrodo Simple y Doblemente Recubiertos Destinados al Relleno Superficial*. Tesis Ingenieril, Centro de Investigaciones de Soldadura. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, CIS-FIM-UCLV. 2012.
5. Gómez-Pérez, C., Paula Perotti, A.; Esmerio Mazzaferro, J. A; Et Al. "Consideraciones sobre el estudio de nuevas composiciones de electrodos para su aplicación en recubrimientos de electrodos destinados al relleno superficial. CNS176.". En: *XXXVII Congresso Nacional de Soldagem. (CONSOLDA 2011) 03 - 06 Outubro*. Natal, Brasil: 2011.
6. Kang, B. Double-strip hyperbola machine-head port of competent plastic double-stage vacuum extruding machine in Esp@cenet, Oficina europea de patentes. 2009, SHUANGYASHAN ORIENTAL WALL MAT: China.
7. CHINA BUILDING NORTH WEST DESIGNING INST , DOUBLE STAGE VACUUM BRICK EXTRUDING MACHINE, ZHANG XUEGONG ; TANG WEILI (inventores), IPC1-7): B28B3/20, 1986/20/08, CN86208005 (U). 1987-08-26.
8. NINGBO FANGLI GROUP CO LTD. Extruding mould of three layer co-extrusion plastics pipes with double machine feeding. Int class B29C fecha de deposito: 18-Jun-2008. Modelo de utilidad CN 201253946 Y.
9. SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES, CROSSHEAD FOR SIMULTANEOUSLY EXTRUDING TWO LAYERS, HOSOKAWA

- HIROSHI(inventor). Class. Int: B29B7/00; B29C47/00. Fecha de deposito: 19820809. Solicitud de patente europea: JP59029141 (A).
10. Del Río Recalde, A. *Extrusora Destinada a la Aplicación de Recubrimiento Doble sobre Núcleo Metálico para la Fabricación Experimental de Electrodo de Soldadura*. Tesis Ingenieril, Centro de Investigaciones de Soldadura. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, CIS-FIM-UCLV. 2011.
 11. Machado-Cárdenas, J. R., Díaz-Aguilar, Liber. *Creación de una biblioteca digital sobre recipientes esféricos*. Pregrado, Centro de Investigaciones de Soldadura. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara. Villa Clara. 2014.
 12. Ramos-Martínez, A. *Diseño y Simulación Computarizada de Elementos Estandarizados para Recipientes a Presión*. Maestría, Centro de Investigaciones de Soldadura. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara. Villa Clara. 2014. Disponible en: intranet.uclv.edu.cu
 13. Anónimo. *Características de SolidWorks Simulation* Consultado el: 13/12 de 2012. Disponible en: <http://www.solidworksedu.com/web/SolidWorks/simulacion/>.
 14. Ramos-Martínez, A.; Gómez-Pérez, Carlos-René; Pérez-Pérez, Daniel. *Softwares especializados para diseño y simulación en la implementación de bibliotecas de recipientes a presión* Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos-pdf5/software-diseno-y-simulacion-bibliotecas-digitales-recipientes-presion/uso-software-diseno-y-simulacion-bibliotecas-digitales-recipientes-presion.shtml>.
 15. Gómez-Pérez, C. *Obtención de fundente fundido para la SAW a partir de rocas minerales cubanas*. Centro de Investigaciones de Soldadura. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas:, Santa Clara. 1996.
 16. Farias Jp, S. A., Surian E. . "The effect of wollastonite on operational characteristics of AWS E6013 electrodes. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2004; 26(3): 1-17."
 17. Indura. *HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DEL MATERIAL*. publicado el: 20/04/05 de 2005, última actualización: 20/04/05. Vol. N°MSDSCE001, 9 pp p.
 18. Perdomo-González, L., D. Aranguiz-Ruiz, Ernesto, Herrera-Artiles, Arnaldo, Cruz-Crespo, Amado, Laredo-Pentón, Francisco I., Quintana-Puchol, Rafael, Gómez-Pérez, Carlos R. "Obtención por procesamiento aluminotérmico de aleaciones al manganeso-cromo para su empleo como carga aleante de un fundente aglomerado aleado". En: *Conferencia Internacional de Ingeniería Mecánica VII COMEC*. Santa

Clara, Cuba. Feijóo. 5-8/nov 2012. p. 9. ISBN 978-959-250-757-9. [Consultado el: Nov/2012].

19. Aws. *Structural Welding Code - Steel*. USA: 2008, Vol. 978-0-87171-090-1, 563 p.
20. Ramos, F. "Empleo de MatWeb para la determinación de las propiedades de los materiales base". En: *Proyecto de Ingeniería Mecánica I. Soldadura*. CIS. UCLV: 2008.

Anexo 1

$\varnothing 20^{H5/h4}$

$20\ H5$	$20\ h4$
$Ta = 9\ \mu m$	$Te = 6\ \mu m$
$ES = 9\ \mu m$	$es = 0\ \mu m$
$EI = 0\ \mu m$	$ei = -6\ \mu m$
$Dmáx = Dn - Es$	$dmáx = dn + es$
$Dmín = Dn - EI$	$dmín = dn - ei$

$$Dmáx = Dn - Es$$

$$Dmáx = 20.000mm + 0.009m$$

$$Dmáx = 20.009$$

$$Dmín = Dn - EI$$

$$Dmín = 20.000mm + 0.000mm$$

$$Dmín = 20.000mm$$

$$Jmín = Dmín - dmáx$$

$$Jmáx = Dmáx - dmín$$

$$Jmáx = Es - ei$$

$$Jmín = EI - es$$

$$dmáx = dn + es$$

$$dmáx = 20.000mm + 0.000mm$$

$$dmáx = 20.000mm$$

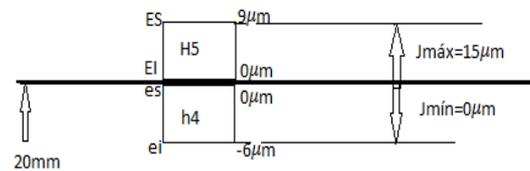
$$Jmáx = Dmáx - dmín$$

$$Jmín = EI - es$$

$$Jmín = 0\ \mu m - 0\ \mu m$$

$$Jmín = 0\ \mu m$$

ajuste móvil



$$dmín = dn + ei$$

$$dmín = 20.00mm + (-0.006mm)$$

$$dmín = 19.994mm$$

$$Jmín = Dmín - dmax$$

$$Jmáx = ES - ei$$

$$Jmáx = 9\ \mu m - (-6\ \mu m)$$

$$Jmáx = 15\ \mu m$$

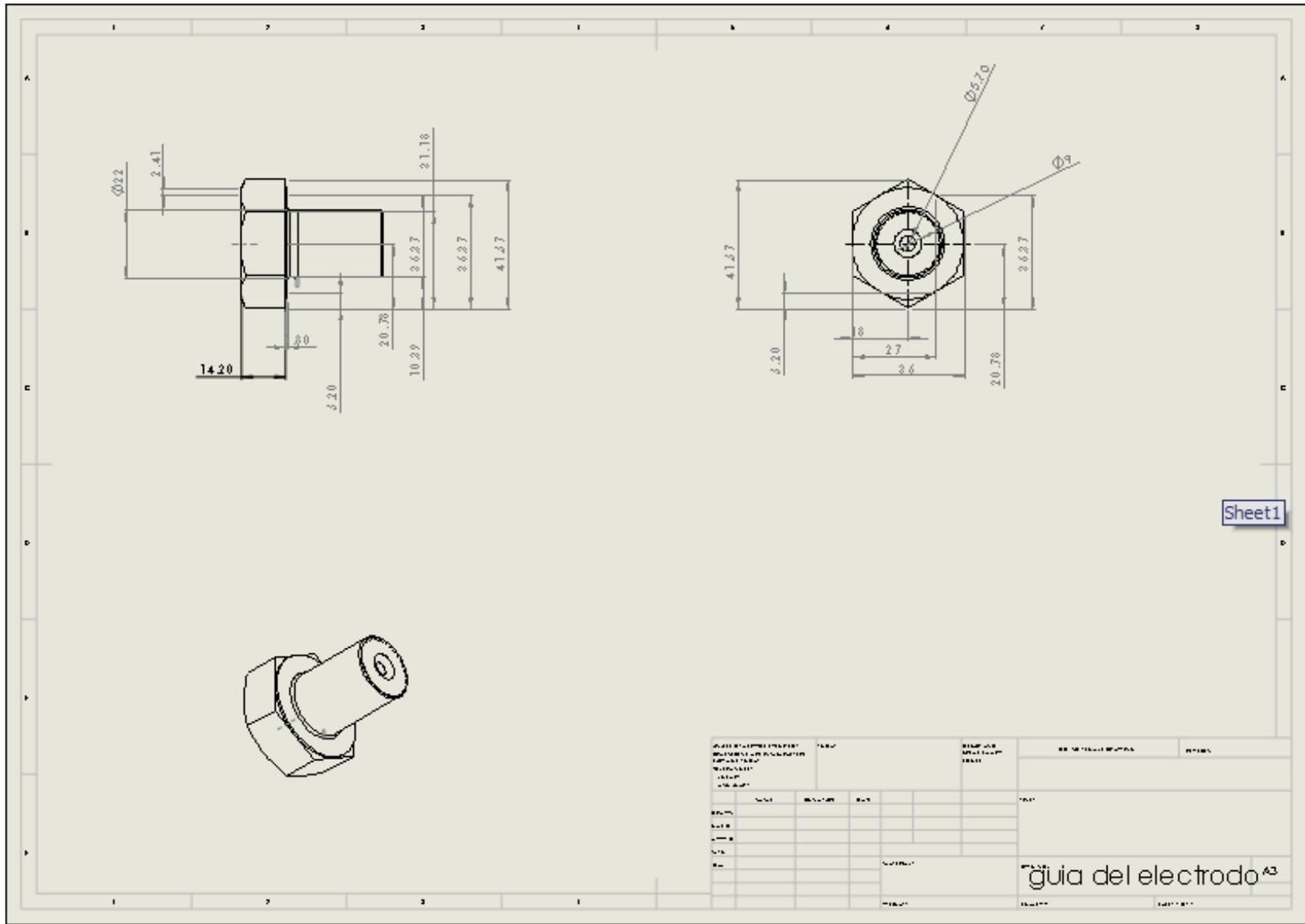


Figura 3: Plano del guías para electrodo de la extrusora

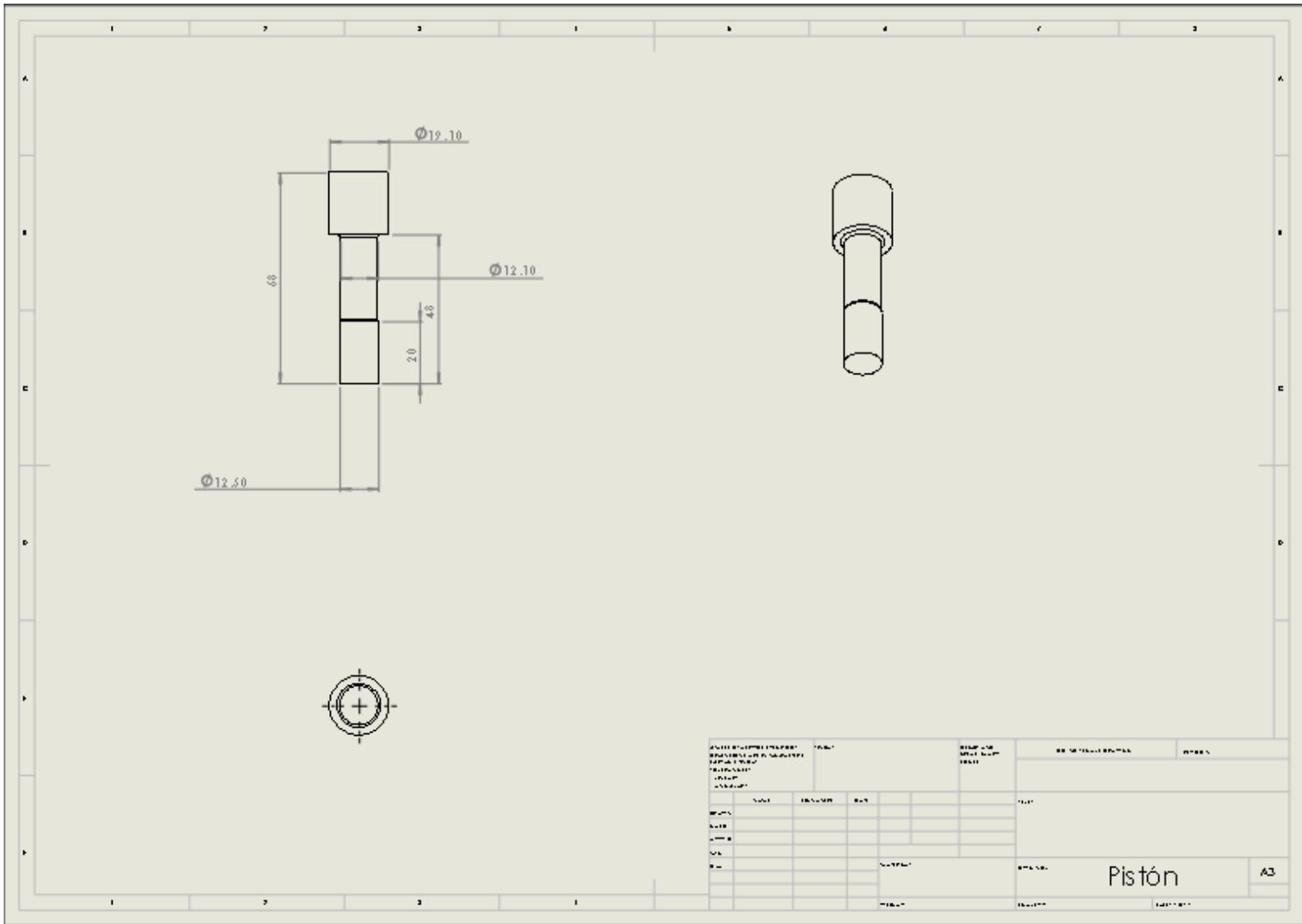
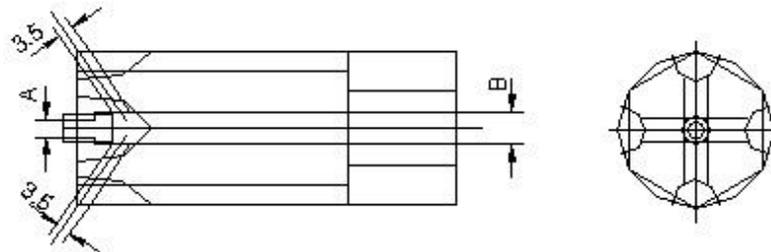


Figura 4: Plano del pistón de la extrusora



A	B	Trefiles
3	4.5	Trefil 1
3	5.8	Trefil 2
5.8	6.6	Trefil 3

Biselar cantos vivos 3X45°

					TREFILES	UCLV				
						Etapas de Elaboración				
						Masa	Escala	Hoja N°	Can. de Hojas	
Mad.	Canó	N° Natif.	Firma	Fecha.	TP	MAS	ESC	H	CH	
Dib.	DIB			FECH		MAT NMAT	COD			
Proy.	PROY									
Rev.	REV									
C.Téc.	CT									
C.Nor.	CN									
Apr.	AP									

Figura 5: Plano de los conductos de alineación del electrodo

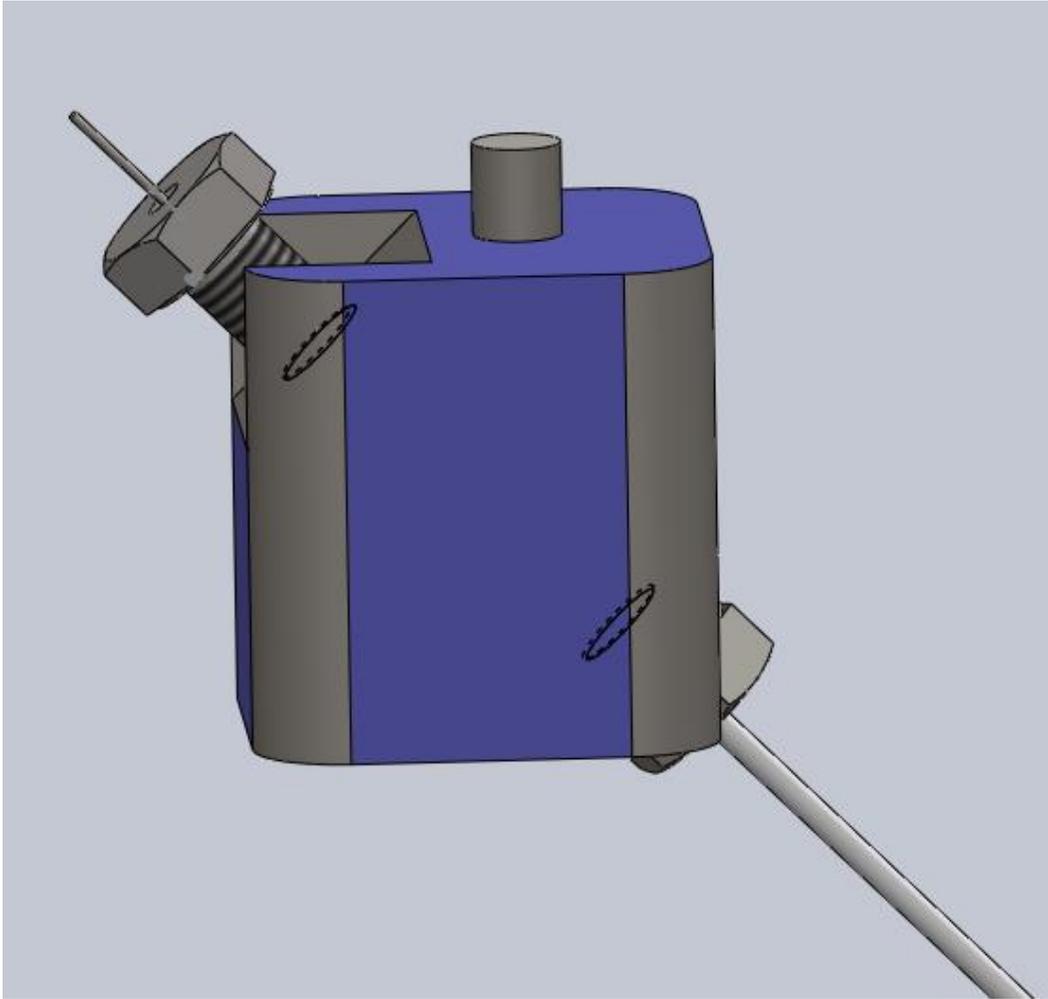


Figura 6: Vista de ensamble de la extrusora

Anexo 3

Código en *MatLab* para la adecuación de los datos experimentales y su procesamiento

```
Corriente=mV*300000/75;
incrementoT=TIME(2)-TIME(1);
cantidad_muestras=length(TIME);
Tiempo=zeros(1,cantidad_muestras);
Tiempo=Tiempo';
j=1;
for i=incrementoT:incrementoT:incrementoT*cantidad_muestras
    Tiempo(j)=i;
    j=j+1;
end
clear i j incrementoT
```