



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN MECATRONICA**

**TEMA: DISEÑO DE UNA AUTOCLAVE PARA CONFECCIONAR MODELOS
DE FUNDICIÓN MEDIANTE LA EXPANSIÓN DE POLIESTIRENO**

AUTOR: DANIEL ISRAEL RUBIO PONCE

DIRECTOR: ING. VÍCTOR ERAZO MSc

Ibarra, 2020



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1003966403		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Rubio Ponce Daniel Israel		
DIRECCIÓN:	Pasquel Monje 2-80 y Av. Víctor Manuel Guzmán		
EMAIL:	dirubio@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	062-956-643	TELÉFONO MÓVIL:	0962753237

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Diseño de una autoclave para confeccionar modelos de fundición mediante la expansión de poliestireno
AUTOR (ES):	Rubio Ponce Daniel Israel
FECHA:	11/12/2020
PROGRAMA:	Pregrado
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniería Mecatrónica
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Víctor Erazo MSc.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

1. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 11 días del mes de diciembre de 2020

EL AUTOR:

A handwritten signature in blue ink, which appears to be 'Daniel Israel Rubio Ponce', is written over a circular stamp or seal.

(Firma).....

Nombre: Daniel Israel Rubio Ponce.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CERTIFICACIÓN DEL ASESOR

Ing. Víctor Erazo director de la tesis de grado desarrollado por el señor estudiante Rubio Ponce Daniel Israel.

CERTIFICA

Que el proyecto de tesis de grado con el título “**DISEÑO DE UNA AUTOCLAVE PARA CONFECCIONAR MODELOS DE FUNDICIÓN MEDIANTE LA EXPANSIÓN DE POLIESTIRENO**”, ha sido realizado por el señor estudiante Rubio Ponce Daniel Israel, para obtener el título de Ingeniería Mecatrónica. Se ha revisado que el trabajo se encuentra concluido para ser presentado en la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, Carrera de Ingeniería Mecatrónica, y fue juzgado por el tribunal correspondiente.

.....

Ing. Víctor Erazo

DIRECTOR DE GRADO

Dedicatoria

Dedico este trabajo primeramente a Dios, quien ha bendecido siempre mi camino, mis caídas y mi esfuerzo a lo largo de todos mis años de estudio, dándome la fortaleza y la paciencia para aprender, aumentar mis conocimientos y llegar hasta este momento tan importante de mi vida profesional.

Con todo mi corazón a mis Padres, Daniel Rubio y Rocío Ponce, por toda esa entrega, apoyo incondicional y motivación de cada día, por la lucha incesable, a pesar de tantas dificultades y circunstancias que se han presenten cada instante.

A mis hermanos Daniela Rubio y Josué Rubio, por la motivación y el acompañamiento diario, por el apoyo a las decisiones y por toda la paciencia en el transcurso de los estudios Universitarios.

A mi amada novia Kimberly, por todo ese amor y apoyo incondicional, por tanta paciencia, por todo el acompañamiento, la motivación diaria, las malas noches, los buenos días, los momentos difíciles; quien ha sido un pilar fundamental para realizar el trabajo con mucha dedicación y responsabilidad, por el apoyo en cada proyecto y en cada decisión, por creer en mí e inspirarme a ser mejor cada día

A mis queridos amigos Peter, Fernando, Hugo, Christian, Xavier, Sairy, Jonathan, Gustavo y Juan por el apoyo, quienes sin esperar nada a cambio compartieron tantas alegrías, tristezas y logros.

A toda mi familia en general y a las personas que estuvieron durante todo este tiempo apoyándome, brindando su aliento para que este sueño se convierta en realidad.

Agradecimiento

Agradezco a Dios, quien me ha brindado salud, tantas bendiciones y la oportunidad de aprender, seguir incansablemente y no decaer para cumplir mis sueños, él que ha puesto a todas las personas que hasta hoy han sido un escalón más para llegar a esta meta tan deseada.

Agradezco a todos los que conforman la Universidad Técnica del Norte, quienes me abrieron las puertas y me brindaron sus espacios para convertirme en un profesional

Un agradecimiento a la carrera de Ingeniería en Mecatrónica y todos los que conforman ese equipo de trabajo que hoy permitió cumplir este sueño tan anhelado. Especialmente a mi tutor, el ingeniero Víctor Erazo Arteaga, quien siempre admire desde que fue mi docente, por todo ese conocimiento, capacidad y dedicación, gracias por toda la paciencia y el conocimiento impartido, de la misma manera a los ingenieros Cosme Mejía y Diego Ortiz, quienes admiro por sus enseñanzas y dedicación en su trabajo como docentes, quienes han solventado mis dudas y me han apoyado en el trabajo de grado.

Un agradecimiento especial al doctor Víctor Cárdenas, quien me brindo el apoyo y la oportunidad para cumplir con este trabajo con todos sus consejos. Agradezco a la Escuela Politécnica Nacional y al tecnólogo Fabián Peñalosa, por abrirme las puertas y brindarme todo el cariño y la ayuda necesaria para culminar con este trabajo.

Gracias a mis Padres y hermanos por todo ese apoyo diario para no decaer y cumplir con dedicación y responsabilidad este sueño tan anhelado.

Un agradecimiento especial a mi amada Kimberly, quien a pesar de las circunstancias me apoya y acompaña en todo este proceso, sin condiciones y con mucho amor, gracias por todo ese ejemplo de dedicación y responsabilidad, por cada jalón de oreja y por cada consejo y corrección brindada.

Resumen

El siguiente trabajo de investigación presenta el diseño y construcción de una autoclave y un molde patrón, para la fabricación de piezas en Poliestireno Expandido (EPS por sus siglas en inglés) de un piñón cónico de concretera; pieza que es utilizada como parte principal del mecanismo piñón-corona de concretas utilizadas para el sector Industrial. Para el diseño de la autoclave y el molde patrón se utilizó el software Solidworks®, además mediante una metodología de diseño conceptual se evaluó las partes y piezas de la máquina a partir de una matriz morfológica, para posteriormente, mediante el método de evaluación Pugh elegir la opción óptima para su construcción y utilizarlo en el análisis de los parámetros y características finales de la pieza en poliestireno expandido. Con el fin de encontrar los valores ideales que permitan obtener una pieza final con excelente acabado, compactación y cohesión entre perlas de poliestireno; se analizaron los parámetros de tiempo, presión y temperatura. Conjuntamente se realizaron 11 pruebas en el laboratorio de fundición de la Escuela Politécnica Nacional, se utilizó la autoclave y el molde de piñón cónico previamente fabricados junto con un caldero 4 BHP (Potencia de un caldero) y en base a la norma NMX-C-137-ONNCCE-2009 la cuál menciona los métodos y especificaciones del EPS para el uso de este material en la industria; se encontró que los resultados para las mejores condiciones al obtener la pieza final en EPS deseadas del piñón cónico son: un tiempo de 35 segundos, una presión de 14,5 psi y una temperatura de 130 °C.

Abstract

The following research work presents the design and construction of an autoclave and a pattern mold, for the manufacture of Expanded Polystyrene (EPS) parts of a conical gear for concrete machines; piece that is used as the main part of the concrete mixer mechanism in the Industrial sector. For the design of the autoclave and the pattern mold, the Solidworks® software was used, also, through a conceptual design, the parts and pieces of the machine were evaluated from a morphological matrix, and later, using the selection method by weighted criteria, to choose the optimal option for its construction and use it in the analysis of the parameters. In order to find the ideal values that allow obtaining a final piece with an excellent finish, the parameters of time, pressure and temperature were analyzed together, 11 tests were carried out in the foundry laboratory of the “Escuela Politecnica Nacional”, the previously manufactured autoclave was used together with a 4 BHP pot of power and based on the NMX-C-137-ONNCCE-2009 which mentions the methods and specifications of EPS for the use of this material in industry, resulting that the best conditions to obtain the final piece in EPS desired is with a time of 35 seconds, a pressure of 14.5 psi and a temperature of 130 ° C.

Índice General

Capítulo I.....	1
1. Introducción	1
1.1. Objetivos.....	1
1.1.1. Objetivo general	1
1.1.2. Objetivos Específicos.....	1
1.2. Planteamiento del Problema	2
1.3. Alcance y Limitaciones	3
CAPÍTULO II.....	4
2. Marco Referencial.....	4
2.1. La Autoclave.....	4
2.1.1. Antecedentes.....	4
2.1.2. Partes de una Autoclave	4
2.1.3. Tipos de Autoclaves	6
2.1.4. Componentes de un Autoclave.....	9
2.2. Poliestireno Expandible	9
2.2.1. Antecedentes	9
2.2.2. Historia del Poliestireno Expandible.....	10
2.2.3. Propiedades del Poliestireno Expandible	12
2.3. Procesos de Fundición por modelo extinguido.....	17
2.3.1. Proceso de fundición por el método de cera perdida	18

2.3.2.	Proceso de fundición por cáscara de cerámica invertida.....	20
2.3.3.	Proceso de Fundición por réplica	22
2.3.4.	Proceso de colado con modelo de espuma perdida	25
Capítulo III.		32
3.	Metodología	32
3.1.	Selección del Poliestireno Expandido.....	32
3.2.	Selección del modelo en EPS	36
3.2.1.	Consideraciones para la selección de modelos	36
3.2.2.	Modelo seleccionado.....	37
3.2.3.	Modelamiento en 3D del molde de la pieza seleccionada	41
3.3.	Diseño Conceptual de la Autoclave	43
3.3.1.	Matriz morfológica de la estructura	43
3.3.2.	Método de evaluación	45
3.3.3.	Elaboración del diseño de la opción seleccionada	47
3.3.4.	Automatización del sistema la Autoclave	58
3.3.5.	Dinámica de Fluidos computacional (CFD).....	63
3.3.6.	Necesidades y materiales de los moldes y las piezas para el proceso de expansión de poliestireno.....	66
Capítulo IV.		69
4.	Pruebas y Resultados.....	69
4.1.	Ensayo N.º 1 para la obtención de un piñón cónico en EPS usando una Autoclave	69

4.1.1.	Objetivo.....	69
4.1.2.	Materiales.....	69
4.1.3.	Procedimiento.....	69
4.1.4.	Esquema del ensayo.....	71
4.1.5.	Resultados.....	72
4.1.6.	Conclusiones del ensayo 1.....	73
4.1.7.	Ensayo N.º 2 – N.º 11.....	73
4.1.8.	Resultados de los ensayos 2 al 11.....	73
4.1.9.	Conclusiones de los ensayos 2 al 11.....	76
4.2.	Ensayo N.º 1 para visualizar la parte interna y los dientes de las piezas en EPS del piñón cónico utilizando un Microscopio.....	76
4.2.1.	Objetivo.....	76
4.2.2.	Materiales.....	76
4.2.3.	Procedimiento.....	77
4.2.4.	Esquema del Ensayo.....	77
4.2.5.	Resultados del Ensayo 1.....	78
4.2.6.	Conclusiones del primer ensayo.....	79
4.2.7.	Ensayos de la pieza 2 a la 11.....	79
4.2.8.	Resultados de los ensayos 2 al 11.....	80
4.2.9.	Conclusiones de los ensayos 2 al 11.....	85
4.2.10.	Curva de parámetros y enfriamiento de los ensayos.....	85
Capítulo V.	90

5. Conclusiones y Recomendaciones	90
5.1. Conclusiones	90
5.2. Recomendaciones	91
Bibliografía.....	92
5.3. ANEXOS	95
5.3.1. ANEXO A (IMÁGENES).....	95
5.3.2. ANEXO B (DIAGRAMA DE CONEXIONES DEL PLC)	99

Índice de Tablas

Tabla 1 Reacción del EPS frente a otros productos químicos. Fuente: [3].	13
Tabla 2 Toxicidad de humos del EPS y varios materiales naturales. Fuente: [3].	17
Tabla 3. Comparación de las características del proceso de fundición por Réplica CS y Cáscara de cerámica invertida. Fuente: [3].	23
Tabla 4 Clasificación de la espuma rígida de poliestireno expandido. Fuente: [17]	32
Tabla 5 Grados de poliestireno expandido según la densidad. Fuente: [16]	33
Tabla 6. Requisitos de densidad para modelos de fundición en EPS. Fuente: [17].	34
Tabla 7Especificaciones para el poliestireno expandido (EPS).	35
Tabla 8 Comparación de datos de Pruebas Mecánicas de la norma NMX-C-137-ONNCCE-2009 [1].	36
Tabla 9 Matriz Morfológica Estructura y Mecanismo.	44
Tabla 10 Método de evaluación Pugh para la estructura y el mecanismo.	46
Tabla 11 Descripción de los componentes para el sistema de control.	59
Tabla 12 Características de diferentes PLCs.	60
Tabla 13Nomenclatura de las variables para el diagrama de conexiones PLC Anexo 8.Br.	62
Tabla 14Nomenclatura de las variables para el diagrama de conexiones. (Anexo B).	63
Tabla 15 Valores de los parámetros del ensayo 1.	72
Tabla 16 Características de la pieza en EPS para el ensayo 1.	72
Tabla 17 Valores de los parámetros de los ensayos 2 al 11.	73
Tabla 18	74
Tabla 19 Valores de distancia promedio entre perlas del corte y del diente para el ensayo 1.	78
Tabla 20 Valores de distancia promedio entre perlas del corte y del diente entre perlas para los ensayos 2 al 11.	80
Tabla 21 Resultados finales de los parámetros para obtener piezas con características satisfactorias.	85
Tabla 22 Prueba de calentamiento con termocupla tipo K.	86
Tabla 23Prueba de enfriamiento con termocupla tipo K.	88

Índice de Figuras

Figura 1. Autoclave de Laboratorio. Fuente: [9].	7
Figura 2. Autoclave médica. Fuente: [9].	8
Figura 3. Autoclave Industrial. Fuente: [9].	8
Figura 4. Autoclave para materiales compuestos. Fuente: [9].	9
Figura 5. Simbología química del EPS [13].	12
Figura 6. Relación entre la presión y la deformación a distintas temperaturas. Fuente: [10].	15
Figura 7. Esquema de los métodos usados para el proceso de fundición. Fuente: [3].	18
Figura 8. Representación del método de cera perdida. Fuente: [3].	20
Figura 9. Representación del método de cáscara de cerámica Invertida. Fuente: [3].	21
Figura 10. Representación del método de Réplica CS. Fuente: [3].	23
Figura 11. Modelos en EPS acoplados para cubrir con cerámica. Fuente: [16].	24
Figura 12. Elementos obtenidos mediante el método de réplica. Fuente: [3].	24
Figura 13. Llenado de EPS a la prensa de moldeo. (a) Transporte de material con aire. (b) Molde cerrado antes de la expansión. Fuente: [16, p. 506].	27
Figura 14. Serie de procesos para la producción de modelos en EPS, Fuente: [16, p. 505].	28
Figura 15. Proceso de fusión de perlas de EPS (a) Recalentamiento, (b) refrigeración y, (c) modelo en EPS, Fuente [16, p. 506].	29
Figura 16. Procedimiento de ubicación de moldes para EPS. (a) Recipiente en base de arena. (b) Distribución del molde. Fuente: [16, p. 501].	29
Figura 17. Sistema de llenado (a) Recipiente lleno de arena, b) Compactado por vibración y vertido de EPS, Fuente: [16, p. 501].	30
Figura 18. Proceso de colado del metal en un racimo de modelos de EPS, Fuente: [16].	30
Figura 19. Piezas obtenidas con el método de espuma perdida.	31
Figura 20. Medida en milímetros de una perla de EPS.	33
Figura 21. Poliestireno Expandido con un grado de perla T y una densidad de 18 a 22 kg/m ³ .	34
Figura 22. Concretera construida en la industria INDUMEI. Fuente: [19].	38
Figura 23. Piñón cónico de la concretera construido en las Industrias Metálicas Ibarra (INDUMEI).	39
Figura 24. Partes de una concretera. Fuente: [23].	39
Figura 25. Piñón cónico de concretera con dientes desgastados.	40
Figura 26. Croquis del piñón de transmisión de potencia en SOLIDWORKS®.	41
Figura 27. Vista de sección de la altura del piñón de transmisión.	42
Figura 28. Molde de piñón de transmisión en vista isométrica.	42
Figura 29. Prototipo experimental de matriz y estructura para fabricación de piezas en EPS.	43
Figura 30. Sistema de Autoclave con caldero, marca Fulton, Fuente: [26].	43
Figura 31. Diseño de la estructura del ensamblaje para el sistema de la autoclave.	47
Figura 32. Estructura de soporte tipo C con guía. Fuente:	48
Figura 33. Estructura con mecanismo de ajuste, a) Vista completa de la estructura con el mecanismo, b) Vista de sección del mecanismo ensamblado con la estructura y la guía roscada.	49

Figura 34. Elementos del mecanismo de ajuste, a) Tornillo o varilla roscada, b) Brida.	49
Figura 35. Cámara de vapor de 2 piezas.....	50
Figura 36. Cámara de vapor inferior, a) tapa inferior externa, b) tapa inferior interna de 120 agujeros. Fuente: Elaborado por Daniel Rubio Ponce.....	51
Figura 37. Diseño de las piezas de la cámara de vapor, a) Tapa superior exterior, b) Tapa superior interior con 120 Agujeros. Fuente: Elaborado por Daniel Rubio Ponce.	51
Figura 38. Ensamblaje de estructura, mecanismo, y distribución de vapor para sistema de autoclave	52
Figura 39. Diagrama de cuerpo libre del mecanismo, P=15 psi.....	52
Figura 40. Análisis de Elementos finitos, cálculo de esfuerzos por Von Mises.....	56
Figura 41. Factor de seguridad del tornillo de sujeción en Aluminio.	57
Figura 42. Factor de seguridad del tornillo de sujeción en Acero.	58
Figura 43. PLC Marca DELTA serie DVP-20SX2.	61
Figura 44. Grafcet para el sistema de la Autoclave.	62
Figura 45. Vista de sección del molde sellado para el Análisis CFD.....	65
Figura 46. Análisis CFD simulado en SOLIDWORKS®.	66
Figura 47. Caldero marca ELECON ubicado en el laboratorio de fundición de la EPN, a) Caldero de 4 BHP de potencia b) Diseño de caldero en 3D.....	67
Figura 48. Manguera SAE 100 R1	68
Figura 49. Llenado del molde con perlas de EPS.....	70
Figura 50. Esquema del ensayo de funcionamiento de la Autoclave.	71
Figura 51. Ensayo 1 - piñón cónico en EPS.	72
Figura 52. Esquema del ensayo 1 utilizando un microscopio.	77
Figura 53. Curvas de parámetros de tiempo, presión y temperatura, tomados de la tabla 19.	86
Figura 54. Curva de calentamiento, temperatura vs tiempo.	87
Figura 55. Curva de enfriamiento del proceso de expansión.	88

Índice de Anexos

Anexo 1. A. Fabricación del molde de piñón cónico.	95
Anexo 2. A. Molde de piñón cónico terminado.	95
Anexo 3. A. Piñón cónico de concretera elaborado por un proceso de fundición convencional.	96
Anexo 4. A. Ensamblaje final de las piezas de la Autoclave y el caldero por medio de mangueras.	96
Anexo 5. A. Estructura y mecanismo de la Autoclave.	97
Anexo 6. A. Autoclave para expansión de poliestireno en molde de piñón cónico.	97
Anexo 7. A. Pieza en EPS dentro del molde.	98
Anexo 8.B. Diagrama de conexiones del PLC DELTA DVP 20SX2.	99
Anexo 9.B. Diagrama de conexiones de los componentes del sistema de la Autoclave.	100
Anexo 10. Escalado de valores proporcionales a 4-20 mA.	100
Anexo 11. Programación Ladder para el sistema de automatización.	100

Capítulo I.

1. Introducción

El presente trabajo de grado se refiere al diseño y construcción de una autoclave para confeccionar un modelo de una pieza que sea de suma importancia para el sector industrial, modelo que será creado en base a la expansión de poliestireno.

La razón primordial para la construcción de esta autoclave es el aporte tecnológico e innovador al sector industrial de la provincia de Imbabura (Proceso de fundición) ya que el proceso de fundición por espuma perdida (en sus siglas en inglés, LOST FOAM CASTING) es un proceso mucho más sencillo al convencional, brinda mayor facilidad y disminuye el uso de materia prima sustancialmente.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

- Diseñar, construir y automatizar una autoclave para expandir poliestireno.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Analizar y establecer los parámetros de la expansión del poliestireno en autoclave.
- Diseñar y Construir una Autoclave que permita expandir y moldear poliestireno.
- Implementar un sistema de control de temperatura y presión que permita consolidar el proceso de compactación y acabado del modelo en poliestireno.
- Analizar el proceso de expansión de poliestireno a partir de moldes.

1.2. Planteamiento del Problema

El proceso de fundición se constituye como uno de los más importantes y más empleados en la industria. Se encarga del desarrollo de nuevas piezas a partir de moldes, en este transcurso, los metales a punto de fusión toman la forma del molde deseado [1].

Los actuales sistemas de fundición y producción de partes y piezas, de formas complejas, relacionadas con mecanismos y estructuras, presentan condicionantes vinculados con tiempos y costos negativos, limitan la eficiencia y eficacia de la producción individual o en serie; entre estos sistemas convencionales se puede tomar en cuenta al proceso de fundición por cera perdida, fundición de Cáscara de Cerámica invertida y a la fundición por réplica; los cuales tienen características similares al proceso de fundición con poliestireno expandido [2].

El material utilizado para este proceso se llama Poliestireno Expandible (EPS), un material plástico celular representado en perlas con tamaños milimétricos, el EPS es derivado del monómero de estireno el cuál presenta características termoestables, este se polimeriza mediante pentano (contenido interno de las perlas); debido a esto su almacenamiento debe ser en lugares frescos y ventilados para evitar que el pentano se retire de la perla de poliestireno, la cual reduce la vida útil de este material [3].

La autoclave es usada para curar y consolidar materiales poliméricos; dentro de un recipiente con un sistema de temperatura y presurización, mediante vapor se eleva su temperatura y su presión, permitiendo fundamentar el material y fijarlo en un molde de una pieza o parte deseada [4].

Si se quiere mayor calor y presión para producir partes con mayor densidad y menos huecos [4], se debe usar una autoclave que permita compactar el poliestireno mediante un sistema de temperatura y presión, basado en la teoría de expansión de poliestireno y la elaboración de moldes para luego llevarlos a la fundición y como resultado obtener piezas o partes complejas con mejor calidad y buen acabado.

1.3. Alcance y Limitaciones

La autoclave será fabricada para trabajar con una presión de operación de 10 a 15 psi a una temperatura de operación de 0 a 150 °C, también, constará con una estructura de sujeción, con un mecanismo tipo prensa, dos platinas que se adaptan al molde, todo este sistema ensamblará a un caldero que contiene válvulas de alimentación, seguridad y drenaje, especialmente una válvula reguladora de vapor que controle el paso de vapor y la cantidad, la cuál será medida con un manómetro en valores de libra por pulgada cuadrada (psi).

Realizar un análisis del poliestireno expandido (EPS) mediante la norma mexicana NMX-C-137-ONNCCE-2009, debido a que en el Ecuador no tienen una norma específica para este material. Y por medio de gráficas comparativas (temperatura, presión - tiempo).

La validación de la autoclave y su proceso se realizará mediante un protocolo de pruebas que servirá para adecuar de manera correcta los parámetros del proceso (tiempo, presión y temperatura).

CAPÍTULO II.

2. Marco Referencial

2.1. La Autoclave

La autoclave es definida como un dispositivo compuesto por cámara herméticamente cerrada; en donde se calienta agua para generar vapor y elevar la temperatura interna de la cámara en un rango de 121 °C a 134 °C, cuyo objetivo es esterilizar los diferentes dispositivos o insumos médicos [5].

En la mecánica de materiales la autoclave cuenta con un sistema que genera calor y presión en su interior, mismo que es utilizado para fabricar piezas de diferentes dimensiones mediante moldeo [6].

2.1.1. Antecedentes

En el siglo XXI, con el desarrollo de la ciencia y la tecnología de la defensa nacional china, especialmente el rápido desarrollo del programa de transbordadores espaciales como el estudio de la alta resistencia de materiales compuestos y el peso ligero en el campo aeroespacial; la tecnología de moldeo en autoclave fue una de las más importantes en la tecnología de formación de materiales compuestos. Con este desarrollo, se han puesto en práctica requisitos más altos, la temperatura y la presión jugaron y juegan un papel decisivo en esta tecnología, sin embargo, el sistema tradicional de control de estas variables no tenía una precisión y efecto adecuado para cada situación [7].

2.1.2. Partes de una Autoclave

Las partes de la autoclave están divididas en las funciones que cumple esta máquina [8]. Empezando por las partes que contiene la tapa de la autoclave, estas son:

- Válvula de control: esta parte permite controlar la presión dentro de la autoclave.
- Asadera: es la que permite retirar la parte superior del equipo.
- Tubo de purga: es el conducto por donde es liberado el vapor que tiene en exceso la autoclave.
- Tapón de sobrepresión: este pequeño objeto permite liberar el vapor de manera constante, como protección de la autoclave.
- Manómetro: instrumento de medición de la presión que hay dentro de la autoclave.

Aparte de la tapa, la autoclave tiene más partes dentro de este y se detallan a continuación [7]:

- Contenedor de Aluminio: es el chasis de la autoclave, la estructura que soportara los golpes y las altas temperaturas.
- Asadera completa: se encuentra en la parte lateral de la autoclave, sirve para levantarlo y movilizarlo.
- Tuerca de tapa superior: es el dispositivo que es parte del mecanismo de aseguramiento.
- Soporte de contenedor interno: es la base del contenedor, comúnmente es de aluminio.
- Calderín o caldera: es el recipiente que se encarga de calentar a la autoclave.

El funcionamiento parte del encendido de la autoclave y depende del tipo de autoclave, así como puede ser eléctrico o a gas como la mayoría de autoclaves industriales [8]. El vapor ingresa a la cámara de la autoclave produciendo la elevación

de la temperatura y presión interna, la autoclave tiene un conducto de drenaje por donde se libera el exceso de vapor.

2.1.3. Tipos de Autoclaves

Las autoclaves son diferenciadas por las temperaturas de funcionamiento y por la forma de extracción del aire de la cámara de esterilización, factores que afectan directamente el tiempo de esterilización y la calidad de esterilización de los paquetes [5].

- **Autoclave gravitacional:** Funciona removiendo el aire por gravedad, ya que el aire frío es más denso y tiende a salir por un ducto dispuesto en la parte inferior de la cámara cuando el vapor entra, no obstante, este proceso es muy lento y favorece la permanencia residual de aire. El tiempo de penetración es prolongado por una incompleta salida de aire, por lo tanto, los tiempos de esterilización son mayores, por esta razón este tipo de dispositivos son considerados obsoletos [5].
- **Esterilizadores de pre-vacío:** Este tipo de autoclave tiene una bomba de vacío o sistema Venturi, para retirar el aire de la cámara rápidamente en forma de pulsos, de modo que el vapor ingrese a la cámara a mayor velocidad. La ventaja de este sistema radica en que la penetración del vapor es prácticamente instantánea aún en materiales porosos, además de las temperaturas a las que pueden ser expuestos los materiales, que generalmente oscile entre 121 °C a 132 °C en períodos de tiempo de 4 a 18 minutos [5].
- **Autoclaves instantáneas (flash):** Estos son esterilizadores especiales, que trabajan a alta velocidad, para tratar instrumentos de los quirófanos desempaquetados y para uso de extrema urgencia. La

idea de estas autoclaves es reducir el tiempo de esterilización, y esto se logra, como ya se ha dicho, elevando la temperatura, por lo que estas autoclaves generalmente trabajan a 134 °C durante un lapso de 3 a 4 minutos [5].

Con base en el tipo de aplicación, los cuatro principales tipos de autoclaves existentes son:

- **Autoclave de laboratorio**

Una autoclave de laboratorio, es un dispositivo que sirve para esterilizar instrumentos e insumos de laboratorio. Aunque se debe tomar en cuenta que, debido a la alta temperatura, ciertos materiales como el plástico y el papel no pueden ser esterilizados [9], como se muestra en la figura 1.



Figura 1. Autoclave de Laboratorio. Fuente: [9].

- **Autoclave de uso médico**

Una autoclave de uso médico a diferencia de uno de laboratorio, es más grande y es usado como un dispositivo para esterilizar usando vapor de agua a presión y temperaturas más altas. Considerado por la directiva 93/42/CEE de la Unión Europea, conocida también como la Directiva relativa a los productos sanitarios, la que establece el uso de una autoclave de uso médico para esterilizaciones hospitalarias [9], esta autoclave se muestra en la figura 2.



Figura 2. Autoclave médica. Fuente: [9].

- Autoclave Industrial

La autoclave en el contexto industrial (figura 3) se refiere a una olla de presión de gran talla [9]. Algunos usos destacados de las autoclaves industriales son:

En la industria alimentaria se utiliza para la esterilización de conservas y alimentos enlatados [9].

En la industria maderera: se utiliza para tratar la madera y aumentar el tiempo de vida y la calidad en las construcciones exteriores [9].

En la industria textil: se utiliza para tratar y teñir las telas [9].

En la industria de los neumáticos: se utilizan para realizar el vulcanizado en caliente.



Figura 3. Autoclave Industrial. Fuente: [9].

- Autoclave para materiales compuestos

Una autoclave de materiales compuestos es un recipiente generalmente cilíndrico usado para curar y consolidar estos materiales. Las autoclaves son diseñadas dependiendo de su aplicación y del volumen de trabajo, así como para el sector aeronáutico [9], como se observa en la figura 4.



Figura 4. Autoclave para materiales compuestos. Fuente: [9].

2.1.4. Componentes de un Autoclave

La dimensión de la pieza a fabricar depende del tamaño de autoclave. Los componentes de una autoclave son: una vasija de presión, una fuente de calor, ventilador para hacer circular el gas en el interior de la vasija de manera uniforme, un sistema para presurizar la vasija, un sistema para aplicar vacío a las partes cubiertas por la bolsa de vacío, un sistema de control de operación de los parámetros [6].

2.2. Poliestireno Expandible

2.2.1. Antecedentes

El Poliestireno Expandido o EPS es un polímero que se le conoce como espuma Flex, Telgopor, hielo seco, isopor, icopor, unicele, entre otros; es una variante física del poliestireno, que a su vez es el cuarto polímero de mayor producción en el mundo, después del PET [10].

El centro especializado en ciencia e ingeniería de polímeros (en su abreviatura CIAP) creado para investigar, desarrollar e innovar conocimientos en el área de los polímeros, así como, en los termoplásticos, su procesamiento y reciclaje, materiales compuestos y biomateriales. Como principal servicio, se realizan ensayos mecánicos y térmicos en la Escuela Politécnica Nacional de la capital en la República del Ecuador [11].

En el año de 1997 en la Ciudad de Quito de la República del Ecuador la empresa Poli expandidos dio inicio a la fabricación y comercialización de Poliestireno Expandible (EPS), con la elaboración soluciones aplicables a obras civiles. Se fabrican moldes, cenefas, cornisas y productos en base a este material para la decoración de interiores. A partir de 2008 se implementa un área de innovación donde la empresa se dedica a investigar sobre nuevas aplicaciones para el EPS, así como en la construcción, publicidad y decoración, realizando productos desarrollados en las líneas de decoración de exteriores e interiores, usando recubrimientos especiales para el mantenimiento de este material y ofrecer una mejor calidad a las infraestructuras [12].

2.2.2. Historia del Poliestireno Expandible

El primer acercamiento por parte del hombre hacia los polímeros fue el celuloide creado por John Wesley Hyatt; patentado en 1869 [13].

En 1839, Eduard Simon, un boticario de Berlín, destiló resina de ámbar con una solución de carbonato de sodio, obteniendo un aceite al que él llamó estiról, hoy conocido como estireno. Dentro de sus observaciones anotó: "Que, con aceite viejo, el residuo que no pudo ser vaporizado sin descomponerse, es mayor que con aceite nuevo; sin duda alguna debido a una conversión continua del aceite por medio de aire, luz y calor en una sustancia parecida al caucho" [13].

Simon, creyó que la sustancia se había oxidado, por lo que la llamó óxido de estiról. Posteriormente cuando él mismo descubrió la ausencia de oxígeno, lo llamó metastiról. Para 1845 Blyth y Hofmann observaron que el metastiról se formaba al exponer el estireno a la luz solar. El químico orgánico Staudinger observó que el Poliestireno se podía fraccionar en diferentes muestras en soluciones con diferente viscosidad; lo que contradecía la idea de que era un agregado coloidal; postuló que, el poliestireno era un polímero de alto peso molecular y que las sustancias poliméricas no estaban sujetas por medio de fuerzas de asociación [13, p. 9].

Dow Chemical fue la compañía pionera en América en la producción de Poliestireno, ideando un proceso conocido como "El de los Diez Galones", el que consistía en llenar bidones de diez galones con estireno resultado de la mezcla de Benceno y Etileno. Los bidones una vez sellados se calentaban lentamente en baño maría por varios días hasta llegar a una polimerización del 99% [13].

Al finalizar la segunda guerra, se descubrió que a tan solo 72% de polimerización del estireno, se mejoraba el proceso de conversión a caucho del mismo [13].

Se descubrió que al añadir peróxido como catalizador al monómero de estireno el tiempo de polimerización disminuía considerablemente y así se pudo duplicar la producción [13].

Koopers Chemical introdujo el proceso de polimerización por suspensión que posteriormente serviría para la producción de espumas de poliestireno [13].

El inventor del Poliestireno Expandido, fue Ray McIntire, un joven investigador de Dow Chemical, él argumentaba haber descubierto este material por accidente cuando trataba de encontrar un aislante eléctrico flexible en la época de la segunda guerra; dentro de sus objetivos buscaba encontrar un nuevo material con características

similares al caucho, de tal manera, que no fuera tan frágil como el Poliestireno virgen; para ello, experimentó con isobutano, un líquido volátil bajo presión [13].

Este material tiene auge para la década de los 50 debido a su facilidad de expansión por medio de vapor dentro de moldes, permitiendo así la manufactura de diversos productos desechables [13].

En la actualidad, el poliestireno se obtiene a partir de la polimerización del estireno. La base para la producción de Poliestireno proviene de un líquido aceitoso transparente de olor dulce llamado estireno, este se obtiene del etilbenceno el cual se adquiere al combinar etileno y benceno; el gas de etileno se obtiene principalmente de hidrocarburos ligeros a través de un proceso denominado "Steam Cracking", en el cual los hidrocarburos se calientan a temperaturas entre 750 y 900 grados Celsius; con el fin de cambiar las largas moléculas en partículas más pequeñas. El etileno es separado de la mezcla por medio de ciclos de compresión y destilación [13].

2.2.3. Propiedades del Poliestireno Expandible

El Poliestireno Expandido (EPS) se define técnicamente como un "material plástico celular elaborado a partir del moldeo de perlas de poliestireno expandible [14, p. 7].

El abreviado del EPS significa Expanded PolyStyrene, se indica en la Figura 5.

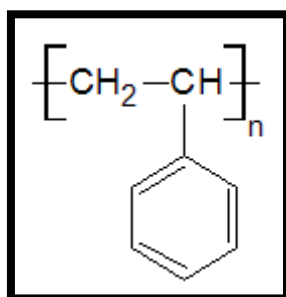


Figura 5. Simbología química del EPS [13].

2.2.3.1. Densidad y Color del EPS

Todas las piezas terminadas en poliestireno expandido se caracterizan por ser exageradamente ligeras y compactas. En función a los usos que se le dé a este material, las densidades están en el rango de 0,01 gr/cm³ a 0,035 gr/cm³. El color normal del poliestireno expandido es blanco y las perlas en crudo son blancas transparentes [3].

2.2.3.2. Propiedades Químicas y biológicas del EPS

El EPS contiene un 98% de aire capturado dentro del 2% de una matriz plástica celular (poliestireno), esto confiere al material una elevada resistencia térmica y una baja densidad. El resultado es un producto estable, químicamente inerte y compatible con el resto de elementos de los sistemas constructivos, garantizando así unas prestaciones constantes durante toda la vida útil de la obra [10]. La elevada inercia química hace que el poliestireno expandido sea estable frente a la mayoría de productos químicos, así como se muestra en la tabla 1 (con la excepción de ácidos concentrados al 100%, disolventes orgánicos como acetona, esterres, etc.) [10].

Tabla 1

Reacción del EPS frente a otros productos químicos. Fuente: [3].

SUSTANCIA ACTIVA	ESTABILIDAD DEL EPS
Agua de mar	No se deshace y permanece estable
Jabones	No se deshace y permanece estable
Ácidos diluidos	No se deshace y permanece estable
Ácido clorhídrico y nítrico	No se deshace, pero disminuye su estabilidad
Ácidos al 100%	Se deshace, no es estable
Soluciones alcalinas	No se deshace y permanece estable
Disolventes orgánicos	Se deshace, no es estable
Hidrocarburos alifáticos sat.	Se deshace, no es estable

Vaselina	No se deshace, pero disminuye su estabilidad, la superficie se contrae	El
Diesel	Se deshace, no es estable	
Combustible	Se deshace, no es estable	
Alcoholes	No se deshace y permanece estable	
Silicona	No se deshace, pero disminuye su estabilidad, la superficie se contrae	

El poliestireno expandido no constituye un substrato nutritivo y, por tanto, no es atacado por los microorganismos. El material tampoco tiene ninguna influencia medioambiental perjudicial, no emite lixiviados y por tanto no afecta a la calidad del terreno ni a las aguas subterráneas [3].

2.2.3.3. Resistencia Mecánica.

La estructura celular proporciona al EPS una elevada resistencia a los esfuerzos mecánicos, esta resistencia se evalúa generalmente a través de las siguientes propiedades [3]:

La Resistencia a la deformación bajo carga (según la norma UNE-EN 1605). Esta propiedad indica cómo se comporta el material sometido a una carga, la deformación en función a la temperatura se incrementa al incrementarse esta, tal como se muestra en la figura 6. Pese a su baja densidad, la singular estructura del EPS aporta beneficios de una resistencia singular a la compresión [10].

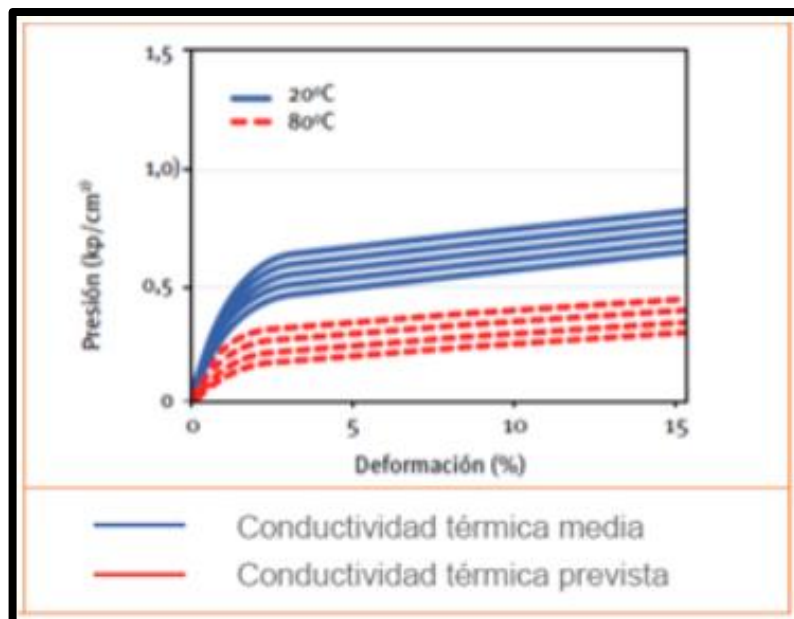


Figura 6. Relación entre la presión y la deformación a distintas temperaturas. Fuente: [10].

La resistencia a la flexión del EPS asegura una buena cohesión del material manteniendo su integridad durante la aplicación y a lo largo de su vida útil. La norma UNE-EN 12089 exige un valor mínimo para esta propiedad de 50 kPa, es decir, un valor de 7.25 psi [3].

Por la particular estructura del EPS y su elaboración, tanto en bloque como en moldeo, el material mantiene sus dimensiones estables incluso sometido a cambios bruscos de temperatura y presión. Según la norma UNE-EN 1603 y 1604 muestra que, la variación del tamaño del EPS influye por el calor y este se valora por medio del coeficiente de dilatación térmica, para los productos de EPS, este valor es independiente de la densidad y se encuentra en un rango de 0,05 y 0,07 $mm * mm * ^\circ C$. Así como una plancha en EPS usada como aislante térmico de 1 metro de longitud y a una temperatura de 20 $^\circ C$ apreciará un cambio en su longitud de 2,0 mm a 2,8 mm [3].

Con respecto a la resistencia a la humedad o absorción de agua, según la norma UNE-EN 12087 y UNE-EN 12088, el poliestireno expandido no es higroscópico; inclusive al sumergir el modelo en EPS por completo en agua, los niveles de absorción no resultan un problema debido a que el volumen cambia en un rango de 1% a 3%, además, mediante las nuevas investigaciones de materiales termoplásticos se han fabricado materias primas que permiten una absorción de agua mucho más bajo [10].

Su estabilidad frente a la temperatura es singular, a bajas temperaturas su comportamiento es excepcional, debido a que sus propiedades no se ven afectadas (excepto las variaciones dimensionales por contracción), a diferencia de elevadas temperaturas como 80 °C o 100 °C para procesos continuos o exactos y sometido a una carga de 20 kPa [10].

2.2.3.4. Propiedades de reacción al fuego.

Según establece el reglamento UE 305/2011, es obligatorio un marcado-CE, y debe ajustarse a las seis Euroclases características de reacción al fuego. El ESP incorpora un aditivo retardante de fuego que otorga al producto la Euroclase E (clases C, D, E productos combustibles) [3].

La reacción al fuego de los materiales aislantes se evalúa mediante un ensayo realizado sobre el producto "desnudo", es decir, tal y como se comercializa [10]. Las calorías presentadas en los materiales fabricados en EPS son de: 40 MJ/kg, siendo dos veces mayor al de la madera que tiene un valor de :18,6 MJ/kg [3].

Cuando el EPS se quema, se comporta como papel o madera. Los efectos de la incineración son: el monóxido de carbono y estireno, los cuales al momento de un incendio, el estireno descompone y emite sustancias como: óxidos de carbono, agua y una

cierta cantidad de humo, la toxicidad de este humo a diferentes temperaturas [3], esta toxicidad se puede observar en la tabla 2.

Tabla 2

Toxicidad de humos del EPS y varios materiales naturales. Fuente: [3].

Toxicidad de humo del EPS y varios materiales naturales					
Muestra	Fracciones emitidas (v/v) en ppm a diferentes temperaturas				
	Gases Desprendidos	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C
EPS (sdt)	Monóxido de carbono	50*	200*	400*	1000*
	Estireno monómero	200	300	500	50
	Otros componentes	Fracciones	10	30	10
	Bromuro de hidrógeno	0	0	0	0
EPS (con retardantes)	Monóxido de carbono	10*	50*	500*	1000*
	Estireno monómero	50	100	500	50
	Otros componentes	Fracciones	20	20	10
	Bromuro de hidrógeno	10	15	13	11
Madera de Pino	Monóxido de carbono	400*	6000**	12000**	15000**
	Componentes Aromáticos	300
Planchas aislantes de fibra de madera	Monóxido de carbono	14000**	24000**	59000**	69000**
	Componentes Aromáticos	Fracciones	300	300	1000
Corcho Expandido		1000*	3000**	15000**	29000**
		Fracciones	200	1000	1000
* ardiendo	** con llama	... no detectado			
Notas: Condiciones de ensayo según DIN 53436, índice de flujo de aire 100 l/h					
Probetas de ensayo de 300 mm x 15 mm x 20 mm comparadas en condiciones normales de uso final					

2.3. Procesos de Fundición por modelo extinguable

Dentro de los procesos de fundición con moldes, existen métodos como: el Método de Cera Perdida, Método de Espuma Perdida el cuál usa poliestireno expandible (Lost Foam Casting – en sus siglas en inglés LFC), método de Cáscara de Cerámica Invertida y el método Fundición por Réplica [3], como se muestra en el diagrama de la figura 7.

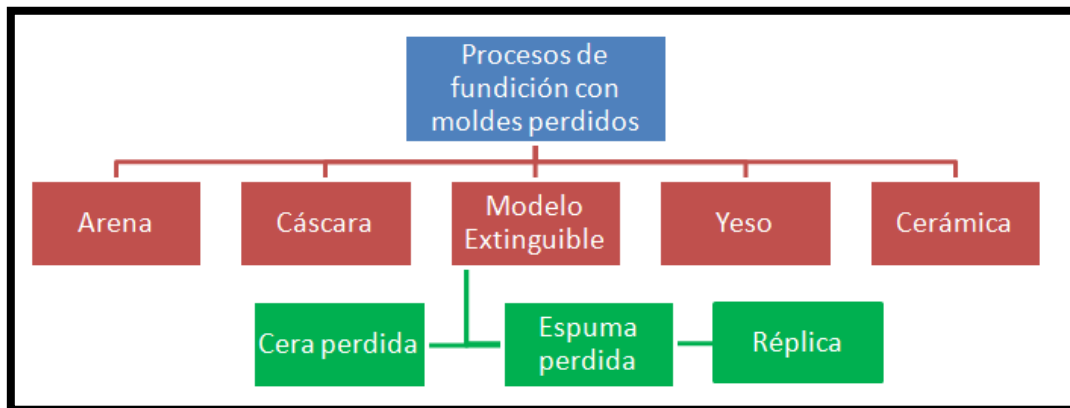


Figura 7. Esquema de los métodos usados para el proceso de fundición. Fuente: [3].

2.3.1. Proceso de fundición por el método de cera perdida

El proceso llamado fundición a la cera perdida para la fabricación de piezas, tiene una antigüedad de miles de años. En su esencia básica, el proceso consiste en la fabricación de un modelo de cera u otro material fusible, luego se construye un molde alrededor de él, entonces se funde la cera dejando una cavidad que es una réplica exacta del modelo original [15].

2.3.1.1. Antecedentes del método de cera perdida

Este método fue usado desde la antigüedad en los pueblos: chinos, para obras de arte, así también como los egipcios y griegos, quienes usaron esto para obtener decoraciones y diferentes tipos de arte. Con el paso del tiempo la industria no se fijó en este tipo de procesos hasta la Primera Guerra Mundial, pero su verdadero progreso industrial se desarrolló durante la Segunda Guerra Mundial, ya que era necesario obtener piezas de formas complicadas en gran cantidad y en menor tiempo al que se usa mecanizando o por medio de un proceso de fundición convencional. [3].

2.3.1.2. Características del proceso de fundición por cera perdida

El proceso de fundición a la cera perdida frente a los demás métodos de fundición, posibilita piezas de formas muy intrincadas. Generalmente tampoco es necesario disponer hoyos para la obtención de aberturas o cavidades [15]. Esto confiere a esta técnica las siguientes características:

- Máxima libertad en la configuración de las piezas.
- Gran exactitud en comparación a los demás métodos de fundición.
- Posibilidad de aplicación de casi todas las aleaciones técnicamente logrables por fundición.
- Supresión de rebabas a lo largo de las juntas de separación entre moldes, propia de otros procedimientos.
- Con ayuda de esta técnica es posible no solamente producir gran número de piezas pequeñas y complicadas con un coste menor, sino también fabricar piezas que antes parecían técnicamente imposibles, así como fundir piezas enteras que debían estar formadas de varias partes.

2.3.1.3. Descripción del proceso a la cera perdida

El proceso de cera perdida consta operaciones sencillas como la construcción de un modelo patrón de la pieza a moldear, la elaboración a partir del modelo patrón, el moldeo inyectando a presión, formación de un racimo para usarlo en varios moldes, formación de un capa para el racimo por inmersión o pulverización de una pintura refractaria, una segunda capa del racimo en el cual se fija la entrada para insertar cera

fundida, luego la extracción de la cera que sobra del molde, fundiéndola a 100 – 120 °C en un horno o mufla para posteriormente recogerla en un recipiente, figura 8.

Después se realiza la cocción del molde en un rango de 500 °C a 1000 °C, se eliminan los últimos restos de cera. [3], este proceso se muestra en la figura 8.

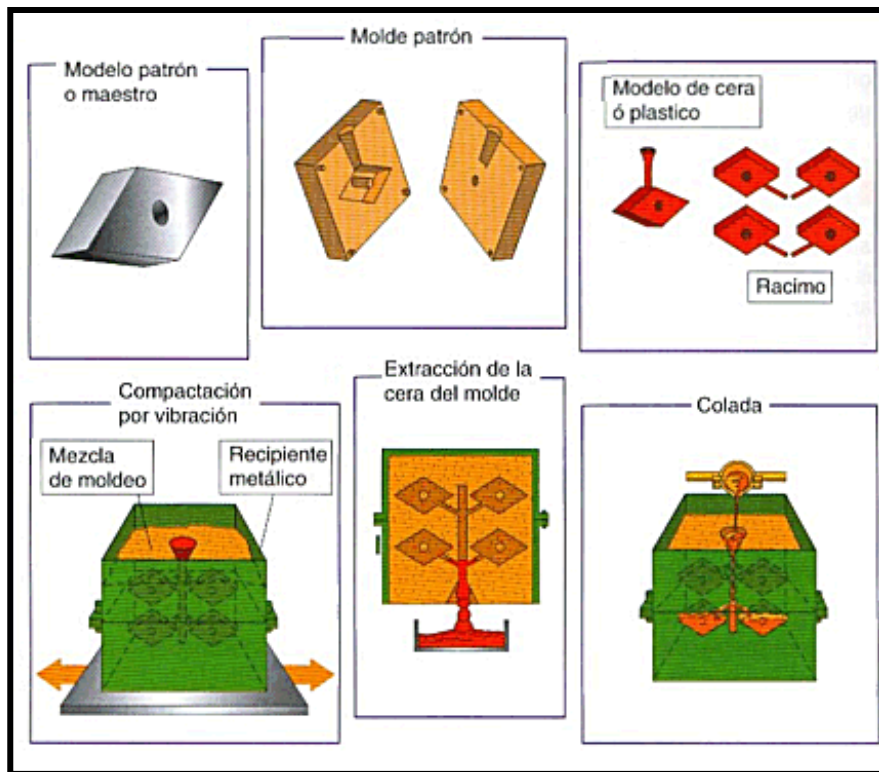


Figura 8. Representación del método de cera perdida. Fuente: [3].

Después de todo este proceso, se agrega la colada del metal líquido, previamente fundido en un horno, después de enfriarlo o llevarlo a un sistema de refrigeración se extraen las piezas, cortando los canales de colada hechos en los racimos y se limpian en un chorro de arena, finalmente se realiza un rectificado de las piezas [3].

2.3.2. Proceso de fundición por cáscara de cerámica invertida

En este método una mezcla de cerámica se aplica alrededor del modelo utilizado en el método de cera perdida, después debe endurecerse y formar un molde desechable [3].

Hay dos procesos distintos para los métodos de cera invertida, el primero es la inversión del sólido seguido del proceso de cáscara de cerámica. Este proceso se ha convertido en un método importante para las aplicaciones en la industria. [3, p. 20].

2.3.2.1. Descripción del proceso de fundición por cáscara de cerámica invertida (CCI)

Un método similar al proceso de fundición por revestimiento es el método de cáscara de cerámica invertida en el cual se utiliza cera o plástico, pero a este se le agrega primero un gel de silicato de etilo seguido de una cama de arena de zirconio para soportar la temperatura a la que va a estar expuesta. Este modelo se recubre con sílice de grano grueso para incrementar más capas y facilitar al proceso en base a un espesor grueso y así soportar el choque térmico de la parte vacía, el proceso posterior a esto es parecido a la fundición por cera perdida. [3]. Los pasos de este proceso se ilustran en la figura 9.

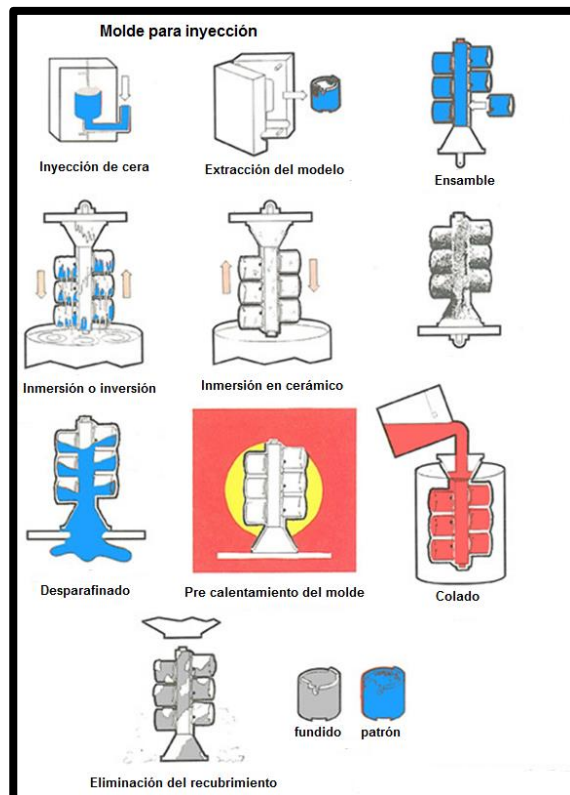


Figura 9. Representación del método de cáscara de cerámica Invertida. Fuente: [3].

2.3.3. Proceso de Fundición por réplica

Este método es exclusivo y patentado en procesos de Fundición de Inglaterra, se caracteriza como un método híbrido, el cuál abarca similares procesos a los de la fundición por réplica y evaporación, en la fundición por inversión se usa patrones en cera o plástico dando forma a un molde en cáscara cerámica y usando un molde en EPS, recubierto con una pintura refractaria y una cubierta de cerámica. [3, p. 23].

2.3.3.1. Descripción del proceso de fundición por réplica

Un modelo patrón de poliestireno expandido se recubre con una capa cerámica. El montaje del molde se cuece entre 500 y 1000°C, dando como resultado la eliminación del modelo patrón y la producción de una capa inerte [3].

El uso de poliestireno expandido para el modelo permite patrones de gran tamaño, de peso ligero para la producción. Además, la cáscara cerámica no tiene que ser gruesa y, por lo tanto, su coste se reduce [3].

El método Réplica tiene dos diferencias:

- Fundición por Réplica FM: similar al proceso con EPS.
- Fundición por Réplica CS: similar al proceso de cerámica invertida.

La diferencia entre estos procesos es el modelo patrón, ya que en la réplica esta elaborado con EPS y cubierto por una cáscara de cerámica, En la Tabla 3 se comparan las características de estos procesos [3, p. 25].

Tabla 3.

Comparación de las características del proceso de fundición por Réplica CS y Cáscara de cerámica invertida. Fuente: [3].

Características	Replica CS	Cáscara de cerámica invertida
Modelo de Fabricación	Acabado liviano y con alta densidad, facilitan un buen acabado superficial y exactitud dimensional.	La cera se contrae, es proceso costoso y modelos pesados.
Fabricación de la carcasa	La pintura refractaria o pasta se aplica de 3 a 4 veces, dependiendo la dimensión de la pieza, su resultado es una cáscara liviana y manejable.	La pintura o pasta refractaria se aplica de 5 a 10 veces, su resultado es una cubierta pesada y no se puede manejar bien.
Vertido	La cáscara está cubierta por arena suelta, para el proceso del vaciado se hace vibrar para impedir que la cascara se rompa.	La cáscara podía romperse debido a la forma de verter el metal.

Las cáscaras entran en un proceso a temperaturas entre 925 a 1000 ° C para quitar todo el material de la pieza en EPS para endurar la cerámica. Esa cáscara entra en un molde de arena para apoyar la capa de cerámica fina y evitar que se rompa [3, p. 25].

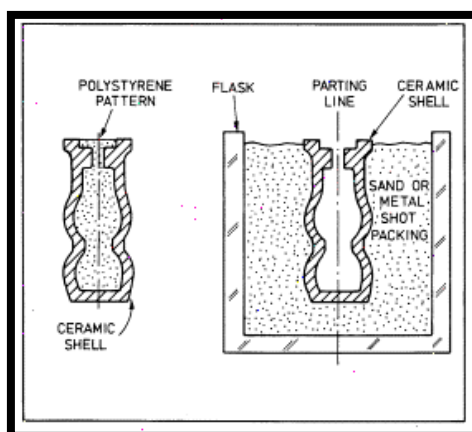


Figura 10 Representación del método de Réplica CS. Fuente: [15].

Para verter el material las cáscaras se ensamblan en depósitos que se llenan con arena suelta, después entran en un proceso de vibración para que se compacte y obtener una densidad alta, luego se emplea un vacío en el depósito antes de verter el material [3], estos modelos se muestran en la figura 11.



Figura 11 Modelos en EPS acoplados para cubrir con cerámica.
Fuente: [16].

Las piezas deben limpiarse después del enfriamiento, estas son sacudidas y enviadas a una zona de limpieza, se debe evitar grietas en la cáscara[3], los elementos obtenidos se muestran en la figura 12.



Figura 12 Elementos obtenidos mediante el método de réplica. Fuente: [3].

2.3.4. Proceso de colado con modelo de espuma perdida

2.3.4.1. Antecedentes del modelo de espuma perdida

El método de espuma perdida se originó en 1958, cuando H.F. Shroyer se le dio una patente para el proceso de fundición por cavidad interior utilizando un modelo en EPS introducido en arena tradicional. El proceso se trataba de quitar el molde antes de verter la colada del metal; el modelo en poliestireno expandido queda dentro del molde de arena y es fundido por la alta temperatura de la colada del metal, uno de los avances más importantes para este proceso ocurre en 1964 con la entrega de la patente para T.R. Smith para el uso de la arena suelta [3].

Con el desarrollo de este proceso era mucho más claro aumentar e investigar todo acerca del poliestireno expandido, siendo algo nuevo e innovador. Entre los años 1960 y 1970 las aplicaciones para este método de fundición eran para el área automotriz, sin embargo, se ha desarrollado rápidamente muchas más aplicaciones industriales usando la espuma perdida o el poliestireno expandido [3].

Este método es usado generalmente para la producción de partes y piezas complejas que requieren acabados minuciosos y tolerancias estrechas, especialmente en las líneas de producción en donde se requiere fabricar piezas en grandes cantidades con cualidades [3].

Este método se encuentra en desarrollo y está siendo aceptado en muchas más industrias por las siguientes ventajas [3]:

- El consumo de arena disminuye y puede reutilizarse.
- Se reduce el costo en manejos de residuos sólidos y líquidos.
- Se reduce el tiempo de mecanizado por las altas tolerancias que se obtienen en el proceso.
- Eficiencia en la etapa de moldeo.

2.3.4.2. Descripción del método de fundición por espuma perdida

La elaboración de piezas por el método de espuma perdida se volvió un proceso importante que permite disminuir los procesos de fundición, ya que con este proceso se elimina el uso de cajas de moldeo, una de las principales oportunidades del proceso, es que se puede elaborar piezas o partes complejas, reducir los tiempos de mecanizado o arranque de viruta, disminuir las operaciones de ensamblaje y reducir la cantidad de desechos sólidos que se produce en un proceso normal de fundición por arena [3].

2.3.4.3. Etapas para la obtención de modelos de poliestireno expandible

El método de espuma perdida tiene mucha importancia en la producción en partes y piezas desarrolladas en aluminio para el área industrial en el sector automotriz, las piezas que pueden ser elaboradas son: partes de motor, bloques de motor, accesorios y partes de tuberías, cigüeñales, bielas, pistones, discos de freno, etc. [3].

En la primera etapa el poliestireno expandible se presenta en forma de perlas llamadas pellets, estos se calientan a temperaturas de 80 °C a 150 °C usando vapor de agua y obteniendo que la pieza aumente hasta 50 veces el volumen normal de la perla, durante esta primera parte las perlas son sacudidas de forma continua para determinar la densidad del poliestireno expandido en función de la presión, la temperatura y el tiempo de exposición, la densidad del material se reduce a unos 0,63 g/cm^3 a densidades en rangos de 0,01 - 0,03 g/cm^3 ; posteriormente las perlas deben ser enfriadas, secadas y almacenadas [3].

En la segunda etapa del proceso (figura 13b), las perlas pre expandidas, las cuales contienen el 90% de aire, son estabilizadas durante un lapso de 24 horas, el momento del enfriamiento las perlas crean un vacío interno el cual sirve para que el material

alcance una mayor estabilidad mecánica y mejorar la calidad en la expansión, este proceso se realiza durante el reposo de los tanques de almacenamiento [3].

En la tercera etapa las perlas preexpandidas se dirigen hacia el molde, para que la distribución de vapor sea más uniforme, posteriormente las perlas se expanden, y al estar comprimidas se compactan tomando la forma del molde, la densidad de la perla en ese momento se determina por el alcance de la expansión desde el momento de la pre-expansión, mediante ciclos de calentamiento y enfriamiento se consigue una densidad homogénea, así como una buena apariencia de las perlas. [3, p. 30].

Cuarta etapa, el material expandido se estabiliza a la densidad deseada, se llena el material alimentando la tolva de la prensa mediante una pistola de llenado con vacío [3], como se muestra en la Figura 13a.

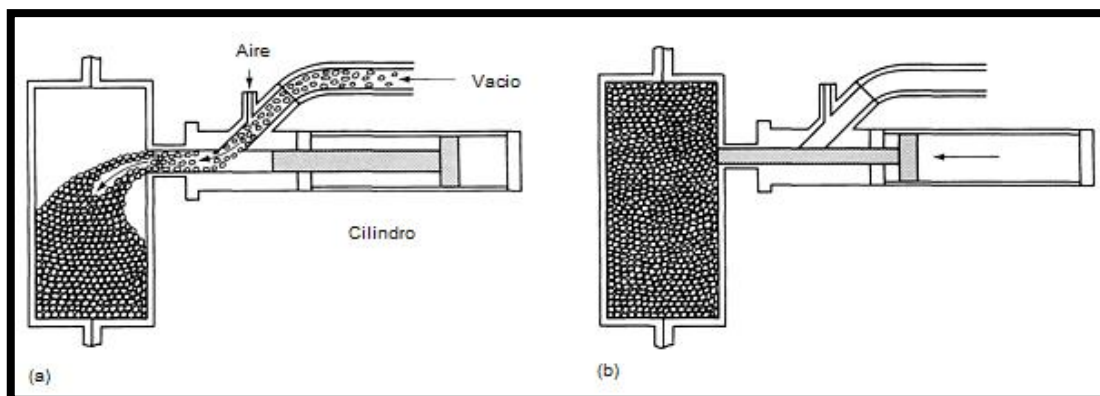


Figura 13. Llenado de EPS a la prensa de moldeo. (a) Transporte de material con aire. (b) Molde cerrado antes de la expansión. Fuente: [16, p. 506]

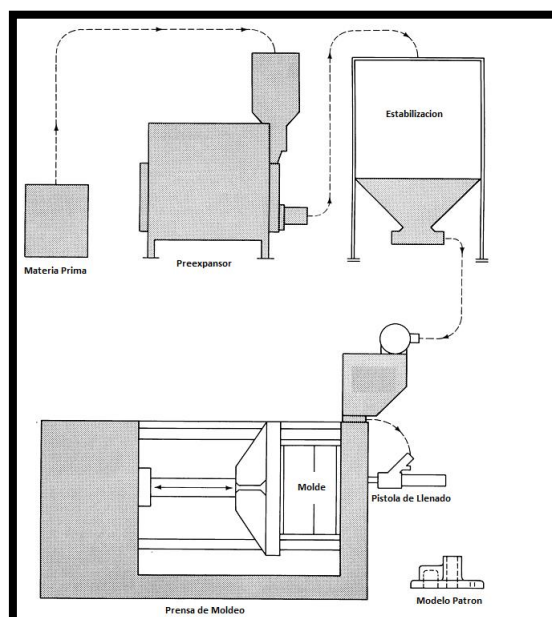


Figura 14. Serie de procesos para la producción de modelos en EPS, Fuente: [16, p. 505].

En la quinta etapa, después del llenado, se añade calor mediante el vapor de agua a través del material, reiniciando el proceso de expansión y suavizando el material, así como en la pre-expansión (como la Figura 15a). El material vuelve a expandirse, llenando el vacío interno de las perlas, fusionándolas entre sí y formando una masa sólida para conformar el modelo en EPS [3].

En la sexta fase la pieza lleva presión a los muros del molde, si la pieza no fue enfriada, al retirarla seguirá creciendo, ocasionando una post-expansión [3]. La refrigeración o enfriamiento se hace mediante la expansión de agua por los muros del molde (como en la figura 15b).

Séptima parte, después de que la pieza se ha enfriado, la prensa se abre y se expulsa el modelo de una manera manual, neumática o mecánica. (como en la figura 15c) [3].

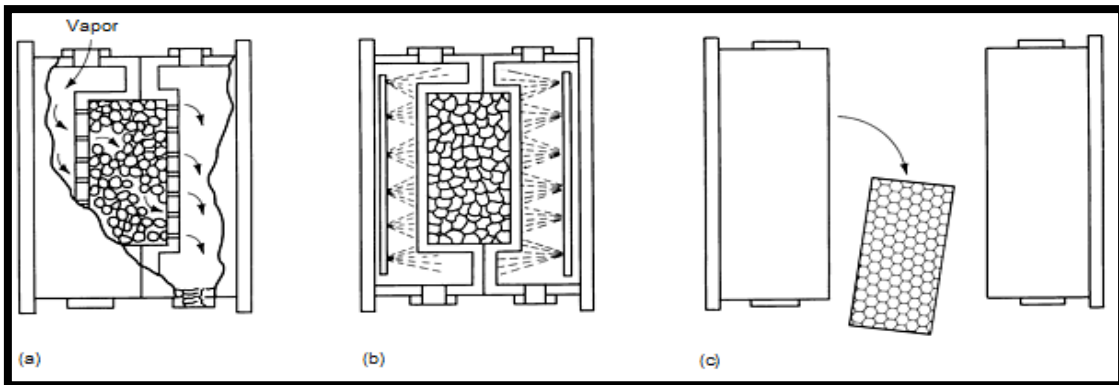


Figura 15. Proceso de fusión de perlas de EPS (a) Recalentamiento, (b) refrigeración y, (c) modelo en EPS, Fuente [16, p. 506].

2.3.4.4. Preparación del modelo en EPS

Una vez que el EPS es convertido se ubica en forma de racimos, se cubre con revestimiento refractario (pintura refractaria), al secarse se inserta el racimo en un recipiente o depósito de arena, es necesario que el espesor en la cantidad de arena sea de 25 a 75 mm en el fondo del depósito (Figura 16a) [3].

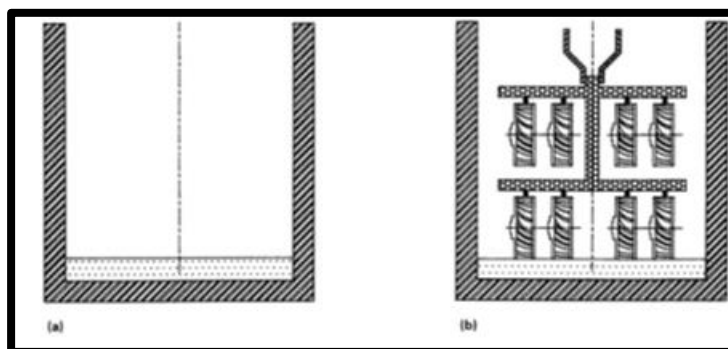


Figura 16. Procedimiento de ubicación de moldes para EPS. (a) Recipiente en base de arena. (b) Distribución del molde. Fuente: [16, p. 501]

Una vez que el sistema patrón se coloca correctamente, la arena suelta (semihúmeda) se introduce. [16], según la Figura 17.

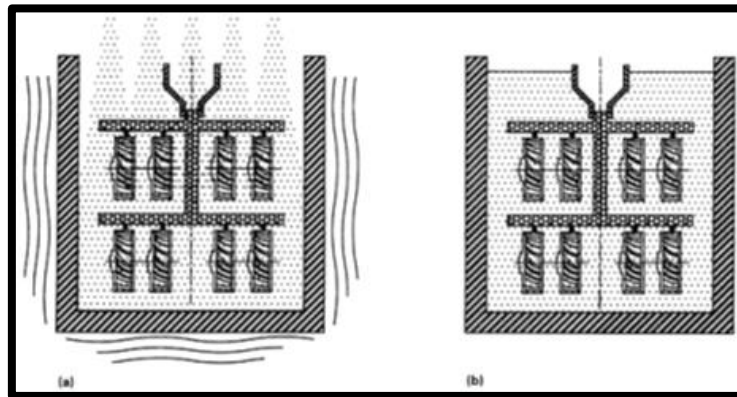


Figura 17. Sistema de llenado (a) Recipiente lleno de arena, b) Compactado por vibración y vertido de EPS, Fuente: [16, p. 501].

Mediante vibración se compacta el material para llenar todas las áreas del molde. Acabado este proceso el recipiente es pasado al área de colado y el metal fundido se propaga por el molde (Figura 18). [3, p. 34].

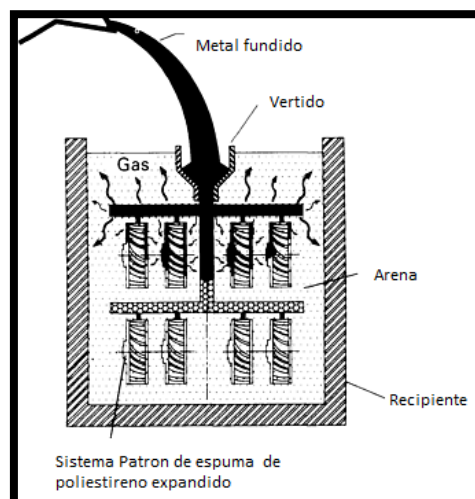


Figura 18. Proceso de colado del metal en un racimo de modelos de EPS, Fuente: [16].

Se deja enfriar la pieza fundida dentro del depósito con arena, se voltea el recipiente y se recoge la arena para su reutilización, aparte se retira la pieza ya fundida[3], en la figura 19 se muestran ejemplos de piezas obtenidas mediante el proceso de LFC.



Figura 19 .Piezas obtenidas con el método de espuma perdida.

Capítulo III.

3. Metodología

3.1. Selección del Poliestireno Expandido

Según la norma NMX-C-137-ONNCCE-2009 se implantan los parámetros para el poliestireno expandido. El literal 4.6 establece la definición del EPS como: "Espuma plástica rígida fabricada a partir de la fusión de perlas de poliestireno expandible que presenta una estructura celular cerrada" [17]. La clasificación de la espuma rígida de poliestireno expandido se basa en la densidad mínima con una tolerancia de +10 %, como lo establece la tabla 3.

Tabla 4

Clasificación de los tipos de poliestireno expandido. Fuente: [17].

Prototipo	Perlas de Poliestireno Expandido (EPS)					
	10	12	15	18	22	29
Densidad						
kg/m ³	8	12	15	18	22	29
(lb/ft ³)	(0,50)	(0,75)	(0,94)	(1,12)	(1,37)	(1,81)

Para la selección de las perlas de EPS, en la tabla 4, los valores de la densidad del EPS18 y EPS22 medidas en kg/m^3 son obtenidos de la norma -NMX-C-137-ONNCCE-2009, la cual demuestra que el EPS con esos valores de densidad son los más adecuados para la construcción.

Según el ASM Handbook, hay varios grados de EPS, como se indica en la tabla 5, los grados de perla T y X favorecen a la producción de moldes con superficies y secciones más lisas en modelos de poliestireno expandido debido a la densidad y tamaño de la perla [16].

Tabla 5

Nivel de perla de poliestireno expandido según la densidad. Fuente: [3].

Nivel de Perla	Diámetro bruto de la perla		Diámetro para 24 kg/m ³ (1,5 lbf/ft ³)		Uso
	mm	in	mm	in	
A	0.83-2.00	0.033-0.078	2.5-5.9	0.097-0.231	Aislamiento
B	0.58-1.2	0.023-0.047	1.7-3.5	0.068-0.138	Empaque
C	0.33-0.71	0.013-0.028	1.0-3.1	0.040-0.082	Vasos (café)
T	0.25-0.51	0.010-0.020	0.74-1.5	0.029-0.058	Espuma perdida
X	0.20-0.33	0.008-0.013	0.61-1.0	0.024-0.040	



Figura 20. Medida en milímetros de una perla de EPS.

Para la tabla 5, se muestra los grados de poliestireno expandido para cada uso. En la figura 20 se muestra la medida de una perla de poliestireno, la cual es de 1,1 mm, ésta se compara con la tabla 4 para verificar el tamaño de la perla y definir su densidad. El EPS pesa aproximadamente 64 kg/m^3 (40 lbf/ft^3) en su estado crudo. Para utilizar el EPS en la elaboración de modelos de espuma perdida y construcción [16, p. 504], su densidad se reducirá al momento de la pre-expansión y expansión del poliestireno a un rango de 16 y 27 kg/m^3 , valores necesarios para usarlos en los requerimientos de la tabla 6.

Tabla 6.

Requisitos de densidad para modelos de fundición en EPS. Fuente: [17].

Metal	Temperatura de la colada		Densidad del modelo de EPS	
	°C	°F	kg/m ³	lb/ft ³
Aluminio	705-790	1300-1450	24-27	1,5-1,7
Latón/Bronce	1040-1260	1900-2300	20-21.6	1,25-1,35
Hierro Gris	1370-1455	2500-2650	≤20	≤ 1,25

Según la tabla 4 y las medidas obtenidas de la perla de poliestireno, se selecciona el EPS T con su respectiva densidad, la cual servirá para analizar los parámetros necesarios al llevarla a la expansión en el molde a seleccionar, Figura 21.



Figura 21 Poliestireno Expandido con un grado de perla T y una densidad de 18 a 22 kg/m^3 .

Tabla 8

Datos de Pruebas Mecánicas de la norma NMX-C-137-ONNCCE-2009 [1].

Propiedades	Unidades	EPS según NMX-C-137-ONNCCE-2009			Resultados Experimentales
Densidad	kg/m ³	18	20	22	20,5
	kPa	208	224	240	312
Resistencia a la Flexión	psi	30	32,5	35	45,32
	kPa	40	45	50	23,64
Resistencia a la compresión (para λ1%)	psi	5,8	6,55	7,3	3,42
	kPa	90	102,5	115	71,81
Resistencia a la compresión (para λ5%)	psi	13,1	14,9	16,7	10,27
	kPa	110	122,5	135	80,95
Resistencia a la compresión (para λ10%)	psi	16	17,8	19,6	11,74

Nota: Los valores de λ son los valores de la deformación colocados en %

Hecha de la comparación de los valores de los principales parámetros a tomar en cuenta en expansión del poliestireno, hay que establecer que estos valores pueden ayudar a futuras investigaciones o aplicaciones del EPS, especialmente en el área de la elaboración de piezas con alto impacto, sometida a esfuerzos o piezas para construcción, etc.

3.2. Selección del modelo en EPS

3.2.1. Consideraciones para la selección de modelos

La fundición es el objetivo final del modelo elaborado a base de EPS, siendo este el proceso principal de manufactura, para el cual se deben analizar varias características antes de empezar con el proceso de expansión.

3.2.1.1. Facilidad de moldeo

Para obtener una parte o pieza de una máquina mediante la fundición se considera 2 procesos: la expansión de EPS y la simplificación del diseño tomando como base, la selección del modelo, evitando complejidades innecesarias y así mismo, disminuyendo la necesidad de utilizar corazones para el proceso de fundición; considerando al proceso de expansión de EPS esencial para mejorar la calidad y la resistencia de la fundición.

3.2.1.2. Esquinas

Se debe evitar a toda costa los ángulos agudos y las esquinas sin redondeos, en vista de que generan grietas y concentradores de esfuerzos; se aconseja elegir piezas con redondeos o con ángulos mínimos de 90°.

3.2.1.3. Espesores de sección

Se debe considerar espesores de sección equivalentes, con el objetivo de reducir contracciones en la fundición; las secciones abultadas o gruesas producen puntos calientes de fundición, es decir, a mayor volumen, se requiere más tiempo de enfriamiento.

3.2.1.4. Ahusamiento

El ahusamiento son los ángulos de salida que permiten al molde la facilidad de desmontaje, esto sucede en moldes de piezas consumibles o desechables como en la del proceso de expansión de poliestireno.

3.2.2. Modelo seleccionado

Para seleccionar el modelo experimental se toma en cuenta las características de modelos ya existentes y las condiciones ya mencionadas anteriormente.

Conforme a la versatilidad del proceso, el cual cuenta con elementos como la utilización de vapor de agua originado de un caldero y un molde sellado (sistema de una autoclave), a la utilidad que presenta en la industria, en la maquinaria y en el equipamiento para el sector de la construcción. Para el proceso de obtención de piezas en espuma perdida (EPS); el modelo experimental propuesto es un piñón de transmisión de potencia de una concretera, la principal característica de este piñón es su geometría, pues, es un piñón ligeramente cónico, ya que tiene 4° en su ángulo del diente al centro del diámetro mayor.

En las Industrias Metálicas Ibarra (INDUMEI), una de las máquinas con mayor demanda es la concretera Hormigonera, figura 22, así como el mantenimiento de las piezas y componentes que conforman este tipo de equipamientos y maquinaria, en la figura 23 se puede observar el piñón cónico.



Figura 22. Concretera construida en la industria INDUMEI. Fuente: [19].



Figura 23. Piñón cónico de la concretora construido en las Industrias Metálicas Ibarra (INDUMEI).

La concretora es una máquina que sirve para la elaboración de hormigón o concreto. Su principal función es mezclar todos los elementos que componen ya sea estos materiales de construcción. Sus partes principales son: las ruedas, el motor, corona de la tolva, piñón de transmisión de potencia, tolva de mezclado, volante de la tolva, barra de tiro.

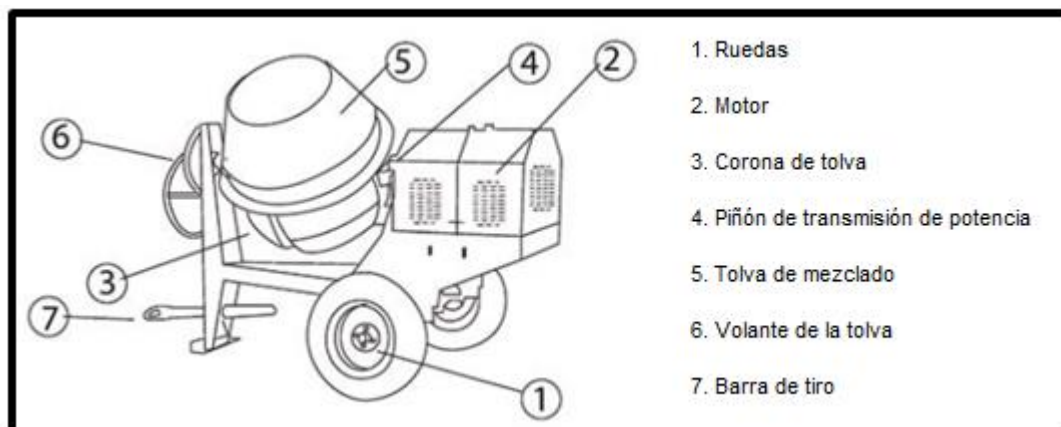


Figura 24. Partes de una concretora. Fuente: [23].

3.2.2.1. Piñón

El piñón es un elemento diseñado para transmitir potencia desde un motor, este elemento es fabricado mediante mecanizado o arranque de viruta. Este piñón tiene un uso indispensable en las concreteteras, siendo una pieza primordial para la transmisión de movimiento [18].

El piñón cónico en la concretetera tiene un eje que se dirige hacia la caja donde se encuentra el motor con sus respectivas poleas; se encuentra junto con la corona de la tolva, figura 25. El método de transmisión tiene como movimiento de entrada y salida un movimiento giratorio ya que parte de un motor rotativo y se une con la corona, los dos con elementos con un eje giratorio.

Así como es uno de los principales elementos para generar el movimiento en la concretetera, este elemento se desgasta con facilidad, debido al tiempo de uso y al movimiento continuo al que se encuentra la máquina; cuenta con 12 dientes ligeramente cónico y sus medidas son: ángulo al centro (α) es igual 4 grados, diámetro externo mayor (Dem) mide 112 mm, el diámetro externo menor 51,8 mm, el diámetro interior mayor (Dim) mide 39,2 mm, el diámetro interior menor mide 35 mm, en la figura 25 se puede ver un piñón cónico con dientes desgastados.



Figura 25 Piñón cónico de concretetera con dientes desgastados.

3.2.3. Modelamiento en 3D del molde de la pieza seleccionada

Para este fin se utiliza el software SOLIDWORKS®, por medio del cual, se pueden obtener las características necesarias, como es el área y el volumen; esto servirá para los resultados en las pruebas con el EPS.

En el presente trabajo, se diseñará el molde experimental del piñón de transmisión, el cual será fabricado y utilizado junto al autoclave, siendo la base para el llenado del EPS y la obtención del piñón de transmisión en este polímero.

En el software ya mencionado se empieza dibujando el croquis de la pieza, con las principales características y medidas del modelo seleccionado, tomando en cuenta que tiene un ángulo de valor igual a 4, como se muestra en la figura 26.

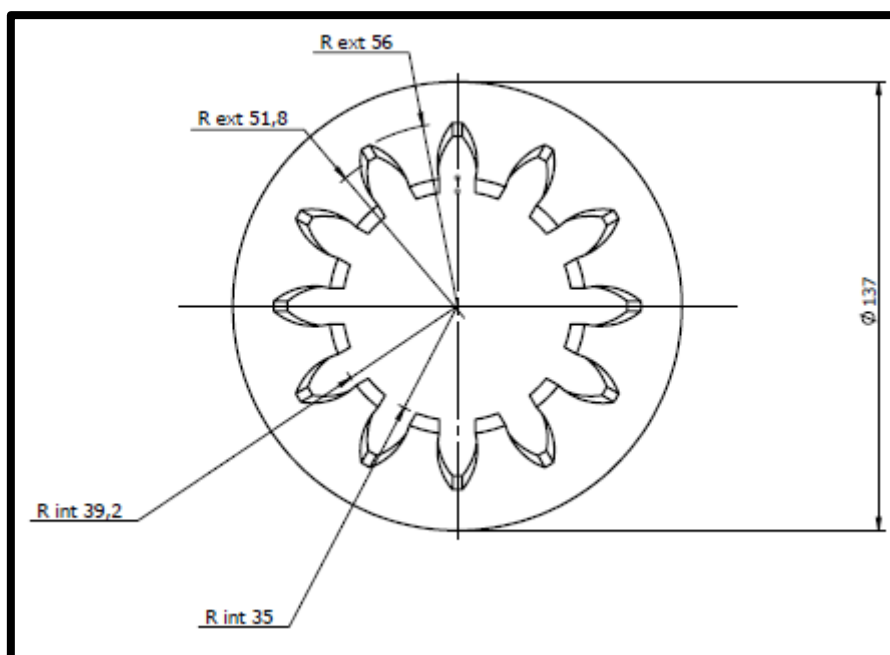


Figura 26. Croquis del piñón de transmisión de potencia en SOLIDWORKS®.

Debido a que el piñón tiene conicidad de 4° grados en sus dientes, debido a la aplicación usada en la concretera se realizó un plano de trabajo, en el cual se indica el croquis similar al original con las medidas de los diámetros interiores, con una altura de 60 mm, como se muestra en la figura 27 la vista de sección del piñón.

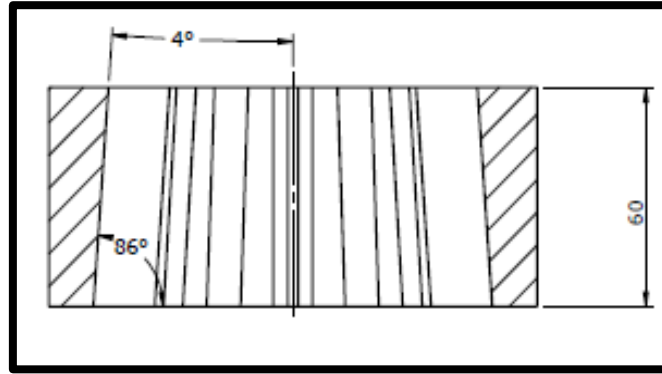


Figura 27. Vista de sección de la altura del piñón de transmisión.

En la figura 28 se muestra el molde del piñón de transmisión, este elemento seleccionado en modelamiento 3D está terminado de acuerdo a las características necesarias para ser fabricado mediante mecanizado o arranque de viruta.

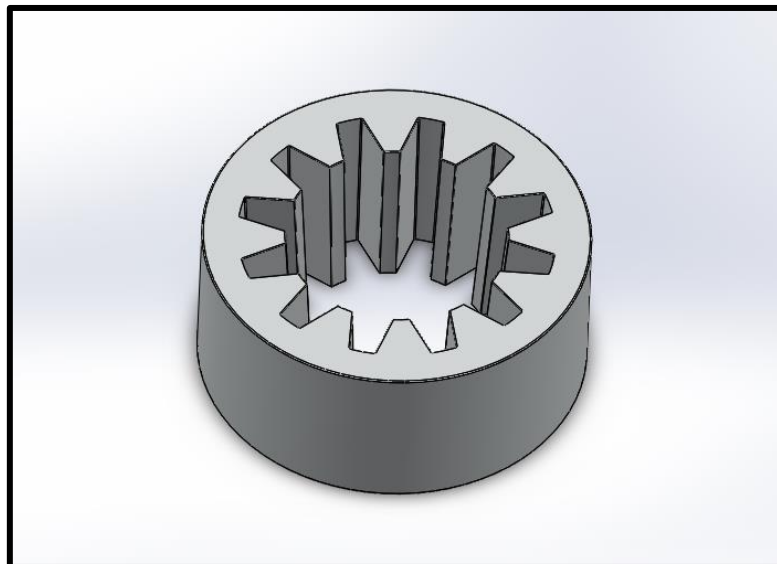


Figura 28. Molde de piñón de transmisión en vista isométrica.

3.3. Diseño Conceptual de la Autoclave

3.3.1. Matriz morfológica de la estructura

La matriz morfológica es un método en el cual se comparan opciones de diseño, el cual consiste descomponer una idea en sus elementos básicos con el objetivo de resolver problemas mediante el análisis de una matriz la cual relaciona todas las ideas finales [19]. Mediante esta matriz se obtendrá un diseño de la autoclave, con el objetivo de facilitar y mejorar el acople, desacople, la sujeción del molde ya seleccionado y la distribución del vapor dentro del mismo molde.



Figura 29. Prototipo experimental de matriz y estructura para fabricación de piezas en EPS.










Se toma en cuenta los diseños de autoclaves existentes en el mercado, con características y aplicaciones similares a la autoclave diseñada para obtener piezas de EPS, como se muestra en la figura 34.



Figura 30. Sistema de Autoclave con caldero, marca Fulton, Fuente: [26].

Tabla 9

Matriz Morfológica Estructura y Mecanismo.

Estructur de soport			
	Tipo L o bastidor	Tipo C	Estructura Sellada
Mecanismo de ajuste, montaje y desmontaje			
	Ajuste con tornillo mariposa y acople de 2 columnas.	Ajuste con tornillo roscado, brida y volante, acople de 1 columna (Tornillo roscado)	Ajuste con tornillos mariposa, acople de tapa selladora
Distribución de vapor			
	Manguera dirigida a la cámara de vapor de 2 piezas	Distribución de vapor dentro del tanque.	Tubería distribuida desde caldero.

3.3.2. Método de evaluación

El método de evaluación utilizado es el método de Pugh, el que permite tomar decisiones y describir las diferentes ideas obtenidas en los criterios descritos en la descomposición funcional [20]; de tal manera, que se compare en la matriz morfológica descrita en la tabla 9 y se generen diferentes soluciones con criterios justos a evaluarse con las condiciones y diseños ya existentes, para determinar la mejor opción del sistema de Autoclave.

3.3.2.1. Soluciones del método de evaluación

- Naranja: Se compone de una estructura de soporte tipo L o un bastidor, el cual tendrá mecanismo de acople de 2 columnas y un ajuste rápido con tornillo mariposa, para la distribución de vapor se utilizará tuberías distribuidas desde el caldero.
- Azul: Consiste en una estructura de soporte tipo C o prensa, la cual, sujetará un mecanismo de acople de 1 columna con un tornillo roscado y un ajuste con volante o palanca de ajuste, la distribución de vapor será mediante mangueras y una cámara de aire de 2 piezas.
- Verde: Consta de una estructura de soporte sellada, la cual estará cerrada y su mecanismo de acople estará compuesto por un tanque y una tapa selladora con tornillos mariposa
- Rojo: Consta de una estructura de soporte cerrada, contaría con un mecanismo de una columna y una distribución de vapor dentro del tanque.

Estas soluciones son planteadas de alternativas existentes ya mencionadas, el objetivo de plantear y analizar estas soluciones, es para mejorar el sistema de acople, de distribución de vapor y por ende su estructura, utilizando un método de Evaluación Pugh

3.3.2.2. Método de Evaluación Pugh

En este método se realiza un análisis cuantitativo, en el que se comparan las diferentes soluciones mediante varios criterios, usado con el objetivo de alcanzar una solución óptima; los criterios a ser analizados se presentan a continuación en la tabla 10.

Tabla 10

Método de evaluación Pugh para la estructura y el mecanismo.

Criterios/Solución	Importancia	Naranja	Azul	Verde	Rojo
Costo	5	-1	1	1	1
Mantenimiento	4	1	0	1	1
Facilidad de Operación	3	-1	1	0	0
Acabado y calidad	4	0	1	0	0
Facilidad de Montaje y desmontaje	3	0	-1	1	-1
Adaptación al Espacio de trabajo	2	1	1	0	0
Peso ()	2	-1	0	1	1
Protección	3	-1	0	-1	0
Rendimiento	2	-1	-1	0	0
Resistencia	2	0	1	-1	-1
Total +		2	5	4	3
Total -		-5	-3	-2	-2
Total, Ponderado		1,5	2,5	0,5	-0,5

La selección óptima mediante este método de evaluación, es la opción de color azul, en la que se establece como solución para la fabricación de la autoclave una estructura de soporte tipo C con un mecanismo de acople que tiene un tornillo roscado, el cual, funcionará como 1 columna y se ajustará a un volante o una palanca de ajuste, y la

distribución de vapor estará concentrada en 2 piezas que formen una cámara de aire por la cual pasará el vapor mediante mangueras conectadas al caldero.

Después de seleccionar la solución óptima con los criterios establecidos, se procede a tomar en cuenta las necesidades y el uso de ciertos materiales para el proceso de la obtención de piezas con poliestireno expandido.

3.3.3. Elaboración del diseño de la opción seleccionada

En base a la matriz morfológica y al método de evaluación procedemos a diseñar nuestras piezas para el ensamble correspondiente, usando el software SOLIDWORKS®.

3.3.3.1. Diseño de la Estructura de soporte

La estructura de soporte seleccionada fue la tipo C, está diseñada con vigas tipo C, con norma RTE INEN 018 referente a “Perfiles estructurales de acero conformados en frío y perfiles estructurales de acero laminados en caliente”, en Acero ASTM A36 (Acabado: Acero Negro) en base al catálogo de la Industria DIPAC [18].

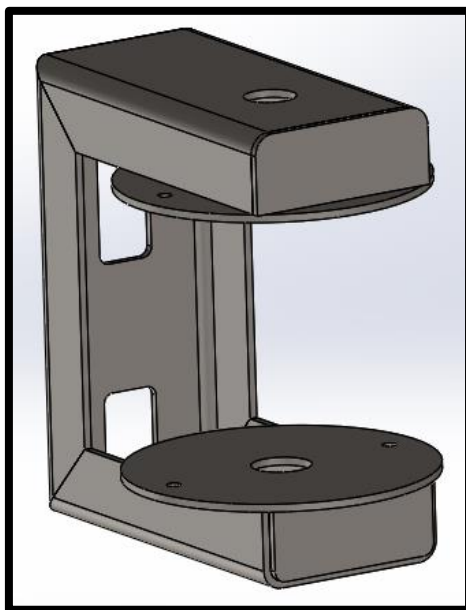


Figura 31. Diseño de la estructura del ensamblaje para el sistema de la autoclave.

Se usa una viga tipo C, debido al peso y al espacio que será utilizado para la distribución del vapor de agua, también se coloca 2 platinas redondas para ensamblar por medio de tornillos el mecanismo de ajuste, como se muestra en la figura 31.

Se coloca una guía roscada, de manera que servirá para el movimiento del mecanismo de ajuste, el cual estará compuesto por un tornillo roscado y un volante o palanca que servirá para adecuar al molde el momento de la expansión, como se muestra en la figura 32.

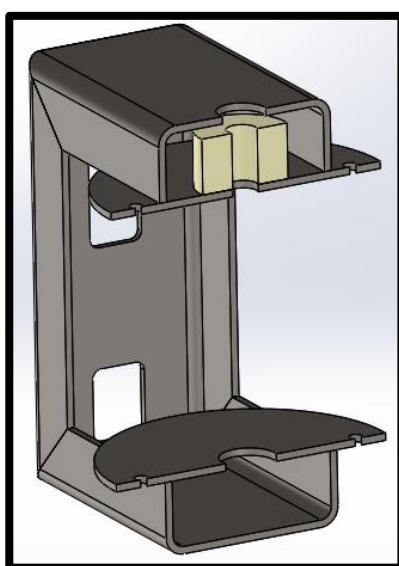


Figura 32. Estructura de soporte tipo C con guía.
Fuente:

En la figura 33, se puede observar que la estructura ya cuenta con el mecanismo de ajuste, este consta de un volante para generar torque y así llegar a un punto de cierre con el sistema de autoclave, contiene un tornillo roscado que actúa como columna, este tornillo es el que va a sellar al sistema junto con la brida que se encuentra en la parte inferior del mecanismo.

En la figura 34a podemos observar al tornillo roscado o también llamado varilla roscada, ya existe en el mercado, la principal característica el tornillo es que su rosca es fina, esto debido a que no va a generar movimiento, sino, va a sujetar al molde junto con

la distribución del vapor, mientras tanto en la figura 34b se observa al diseño de la brida, de igual manera, esta se encuentra en el mercado, en conjunto con el tornillo.

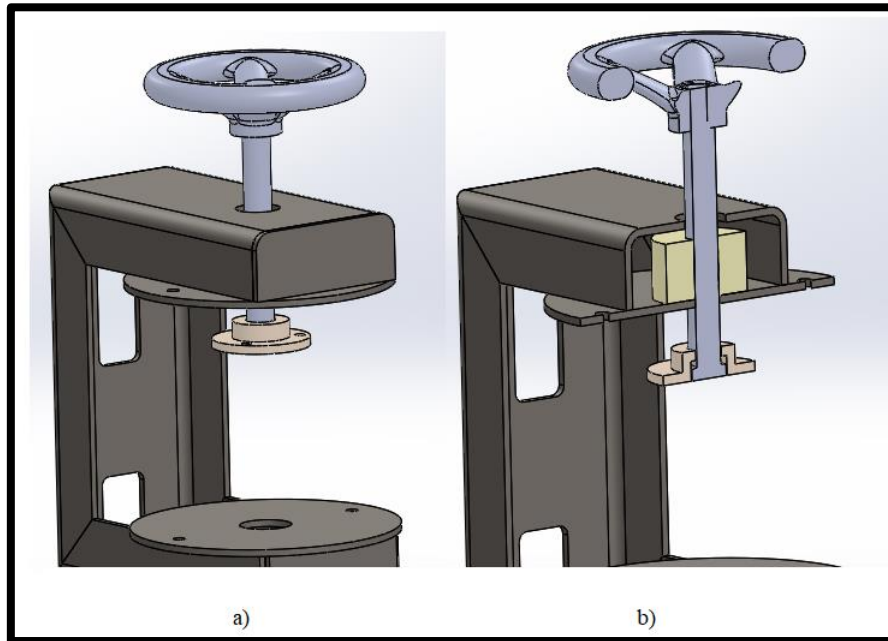


Figura 33. Estructura con mecanismo de ajuste, a) Vista completa de la estructura con el mecanismo, b) Vista de sección del mecanismo ensamblado con la estructura y la guía roscada.

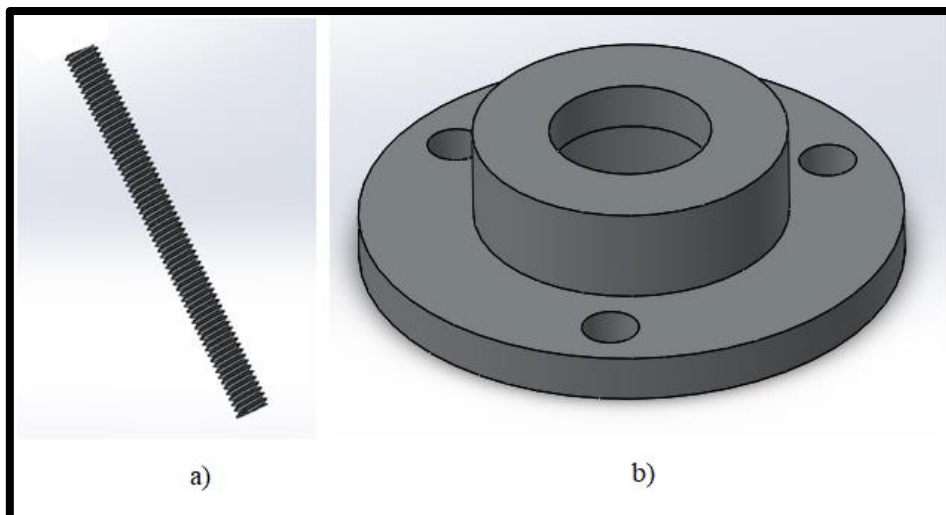


Figura 34. Elementos del mecanismo de ajuste, a) Tornillo o varilla roscada, b) Brida.

Para concentrarnos en la distribución de vapor, debemos tomar en cuenta el diseño de una cámara de vapor, como se muestra en la figura 36. Esta cámara va a recibir el vapor de agua y va a distribuir en todo el molde patrón con el objetivo de formar la pieza ya seleccionada en EPS.

Las dos piezas que forman la cámara de vapor están fabricadas en Aluminio, este material es más costoso que el acero negro o el acero inoxidable, pero es mucho más liviano; el objetivo de que estas piezas estén construidas en aluminio es debido a su peso, es importante que el mecanismo sea ligero y deba soportar únicamente la presión que ejerce el vapor de agua emitida desde el caldero, la cámara de vapor se observa en la figura 35.

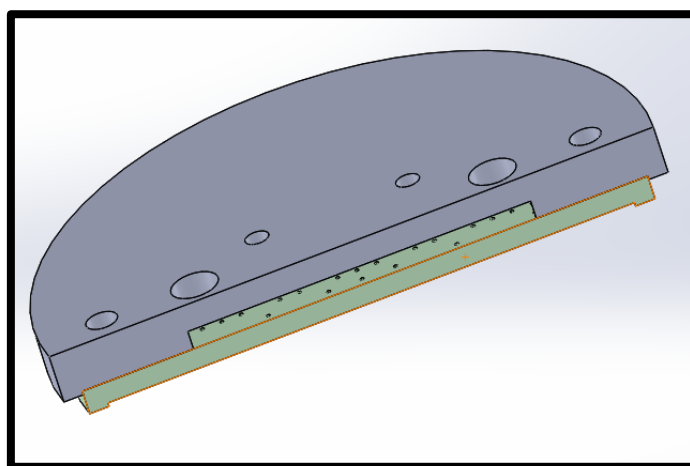


Figura 35. Cámara de vapor de 2 piezas.

En la figura 36a se muestra la tapa exterior de la cámara de vapor, esta pieza cumple la función de entrada del vapor; cuenta con dos agujeros para distribuir el flujo de vapor por toda la cámara. La salida de vapor es distribuida por la tapa interior de la figura 36b, esta pieza cuenta con 120 agujeros de 1 mm de diámetro, los que ayudan a evitar que las perlas de EPS escapen a la cámara de vapor, estos agujeros disminuyen las rebabas en el acabado superficial de la pieza final.

Al tener 120 agujeros de 1 mm de diámetro en la tapa interior de la cámara de vapor lograremos una mejor transferencia de flujo de vapor y de calor hacia el poliestireno. Esto observaremos al realizar un posterior análisis de la distribución del vapor.

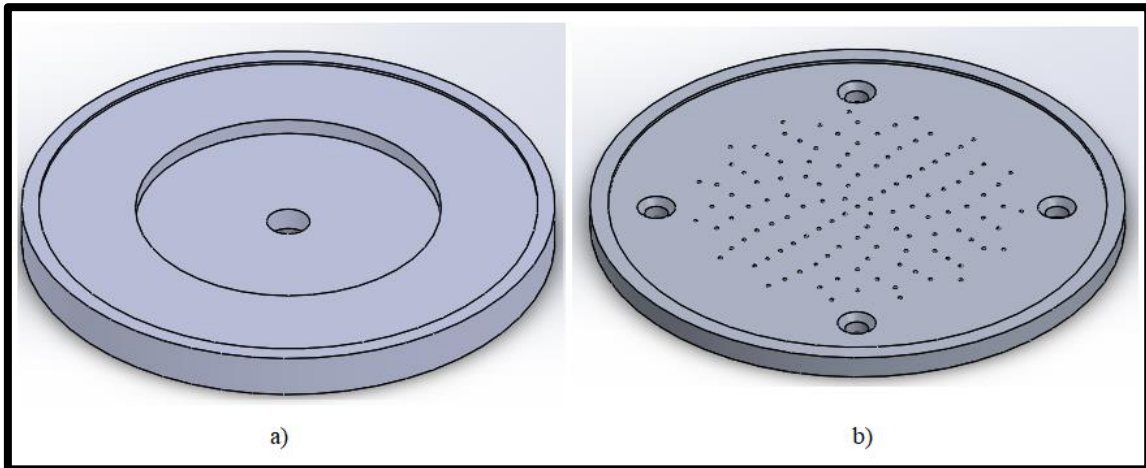


Figura 36. Cámara de vapor inferior, a) tapa inferior externa, b) tapa inferior interna de 120 agujeros. Fuente: Elaborado por Daniel Rubio Ponce.

En la parte inferior de la estructura encontramos otra cámara de vapor de 2 piezas, en este caso la tapa externa cambia debido a que no hay ningún mecanismo, como se muestra en la figura 37a, la tapa interior no ha cambiado y se muestra en la figura 37b.

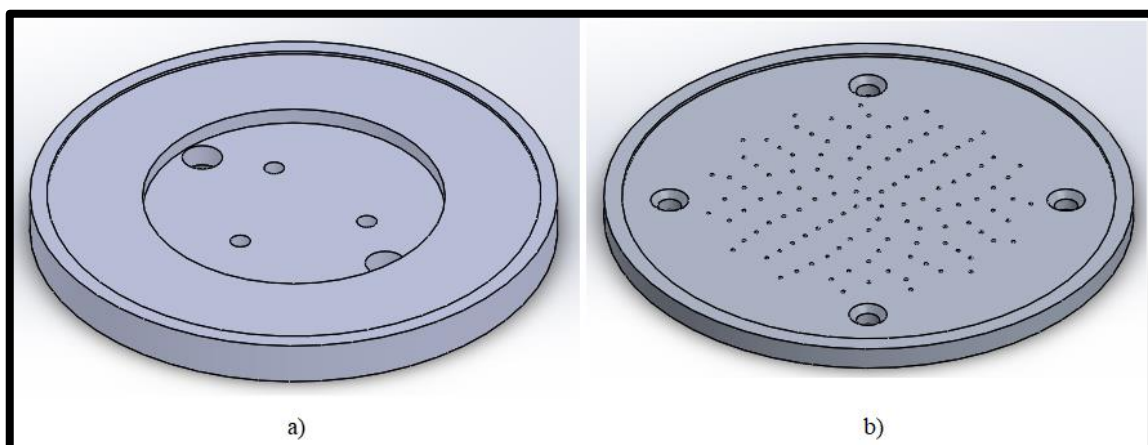


Figura 37. Diseño de las piezas de la cámara de vapor, a) Tapa superior exterior, b) Tapa superior interior con 120 Agujeros. Fuente: Elaborado por Daniel Rubio Ponce.

El ensamblaje final se muestra en la figura 38, este va conectado mediante mangueras y acoples rápidos a la salida de vapor del caldero.

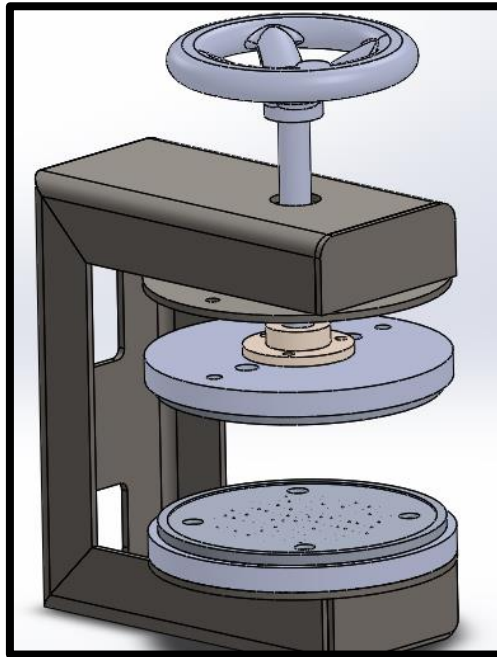


Figura 38. Ensamblaje de estructura, mecanismo, y distribución de vapor para sistema de autoclave

3.3.3.2. Diseño del mecanismo y del tornillo de sujeción

Es el eje vertical (tornillo) encargado de sellar el sistema, es decir, el proceso de expansión del poliestireno junto a las platinas que estarán sometidas a un flujo de vapor con una presión máxima constante de 15 psi (1 bar).

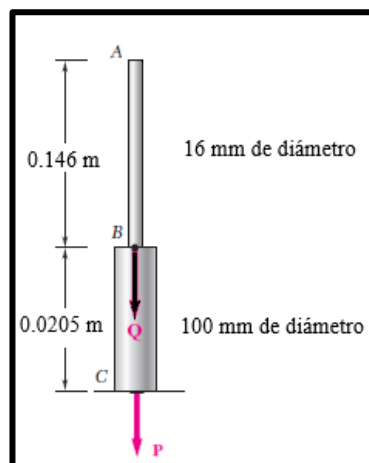


Figura 39. Diagrama de cuerpo libre del mecanismo, $P=15$ psi.

En la figura 39 se observa el diagrama de cuerpo libre con las medidas específicas para el mecanismo, en el que actúa la presión en la parte inferior (punto C).

Para diseñar el tornillo primero vamos a encontrar el diámetro mínimo para los valores máximos de presión, en donde, vamos a comparar con el diámetro de 16 mm del tornillo existente en el mercado, para esto vamos a usar las siguientes fórmulas establecidas en el principio de Saint Venant para esfuerzos con cargas axiales o también llamadas tensiones longitudinales:

$$1. \sigma = \frac{F}{A_{BC}}, \text{ Fórmula para el cálculo del esfuerzo con una carga puntual en un área específica [21].} \quad \text{Ec. (1)}$$

$$2. \sigma_{perm} = \frac{F}{A_{AB}} = \frac{351 \times 10^3 \text{ MPa}}{\left(\frac{L}{r}\right)^2}, \text{ Ecuación de Euler para encontrar el esfuerzo permisible [21].} \quad \text{Ec. (2)}$$

Datos:

$$\sigma = P = 15 \text{ psi} = 103421 \text{ Pa}$$

$$L = 146 \text{ mm} = 0,146 \text{ m}$$

$$d_{BC} = 153,8 \text{ mm} = 0,1538 \text{ m}$$

$$A_{BC} = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 0,01857 \text{ m}^2$$

En la ecuación 1 despejamos la letra F para calcular la fuerza aplicada en esa Área específica.

$$F = \sigma \cdot A_{BC} \quad \text{Ec. (1)}$$

$$F = 1920,5 \text{ N}$$

Usando los datos y los valores calculados en la ecuación 2 calculamos la r , siendo el radio mínimo para el tornillo de sujeción.

$$r = 0,003488 \text{ m} = 3,488 \text{ mm}$$

$$d = 2 \cdot r = 6,976 \text{ mm}$$

Es decir, que para diseñar el tornillo se necesita un valor mínimo de 6,976 mm de diámetro; y comparando con el tornillo de 16 mm de diámetro, la selección está muy bien hecha, debido a que el tornillo de 16 mm ya existe en el mercado a un bajo costo.

Para el análisis del mecanismo se usan las siguientes fórmulas:

- Cálculo las áreas de los dos elementos, como se muestra en la Ecuación 3 y 4.

Datos:

$$d_{BC} = 0,1538 \text{ m} , d_{AB} = 0.016 \text{ m}$$

$$A_{AB} = \pi \cdot \left(\frac{d_{AB}}{2}\right)^2 = 2,011 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \quad \text{Ec. (3)}$$

$$A_{BC} = \pi \cdot \left(\frac{d_{BC}}{2}\right)^2 = 0,01857 \text{ m}^2 \quad \text{Ec. (4)}$$

- Cálculo de la deformación en el elemento AB, usando la ecuación 5.

Datos:

$$E_{AB} = 200 \times 10^9 \text{ Pa}, \text{ Módulo de Elasticidad del Acero.}$$

$$E_{AB} = 200 \times 10^9 \text{ Pa}, \text{ Módulo de Elasticidad del Aluminio.}$$

$$\delta_{AB} = \frac{F \cdot L}{E \cdot A_{AB}} \quad \text{Ec. (5)}$$

$$\delta_{AB} = 6,971 \times 10^{-6} \text{ m}$$

Analizando el valor de la deflexión en la parte BC para encontrar el esfuerzo en Q, se lo planteamos como una suma en base a las direcciones (ecuación 6) de las fuerzas como se muestra diagrama de cuerpo libre de la figura 39:

Consideramos a $\delta_{AB} = \delta_{BC}$ si la deflexión en A = 0 y planteamos lo siguiente:

$$F = (Q - P) \quad \text{Ec. (6)}$$

$$\delta_{AB} = \delta_{BC} = \frac{F \cdot L}{E \cdot A_{BC}}$$

$$\delta_{AB} = \frac{(Q - P) \cdot L_{BC}}{E_{BC} \cdot A_{BC}}$$

$$6,971 \times 10^{-6} = \frac{(Q - P) \cdot L_{BC}}{E_{BC} \cdot A_{BC}}$$

Y usando la fórmula (Ecuación 1):

$$\sigma = \frac{Q}{A_{BC}}$$

Encontramos que:

$$\sigma_q = 4\,422\,339,01 \frac{N}{m^2}$$

$$\sigma_q = 4,422 \times 10^6 \frac{N}{m^2}$$

Comparado con la simulación realizada en el Simulador de SOLIDWORKS®, por medio del método de análisis de elementos finitos encontramos que los valores de los esfuerzos en el punto B (Esfuerzo Q) son similares a los calculados previamente, en la figura 41, se muestra que el valor máximo es de $\sigma = 4,201 \times 10^6 \frac{N}{m^2}$; el software lo analiza por el Criterio de Von Mises.

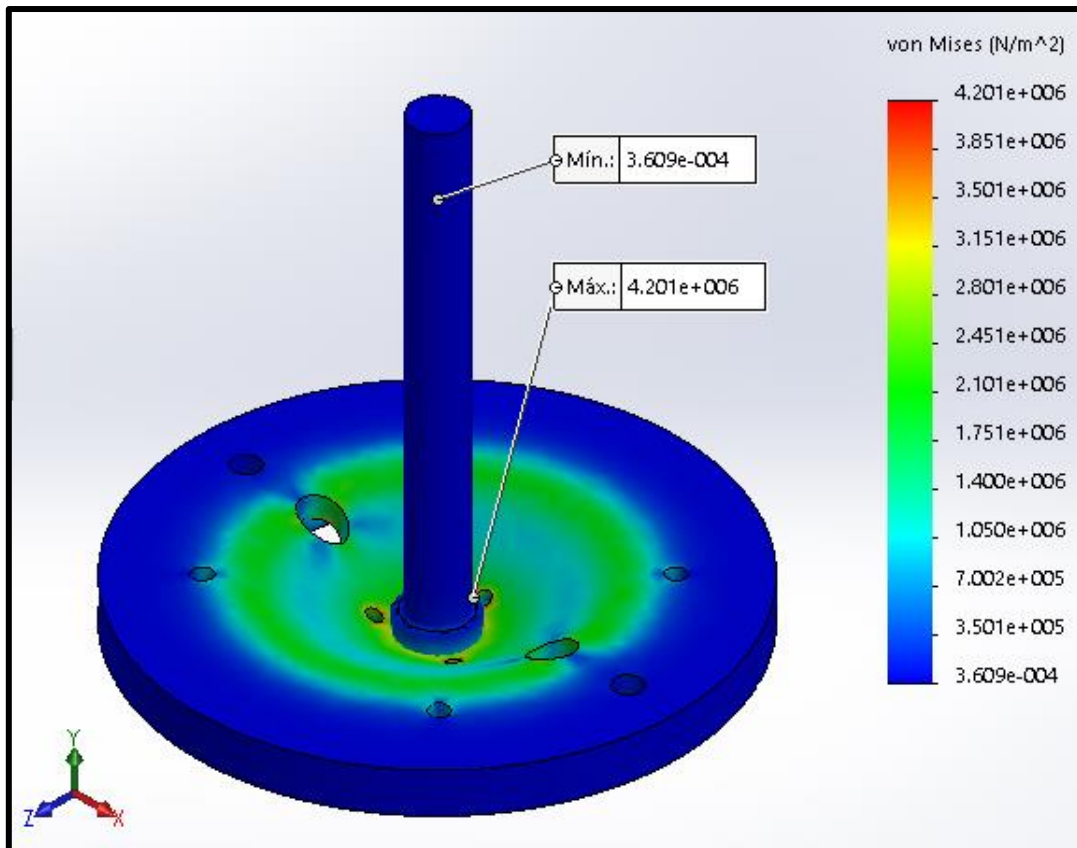


Figura 40. Análisis de Elementos finitos, cálculo de esfuerzos por Von Mises.

Una vez realizado el análisis estático del mecanismo y hallado los valores a los esfuerzos por medio de los 2 métodos previamente calculados, se procede a encontrar el factor de seguridad utilizando el criterio de Von Mises con la siguiente formula:

$$T = \sqrt{T_x^2 + T_y^2 - T_{xy} + 3\tau_{xy}^2} \quad \text{Ec. (7)}$$

En donde:

$T^P = \frac{P}{A}$, Es el valor del esfuerzo axial que ya hemos encontrado.

$S_y = 90 \text{ MPa}$, Límite de Fluencia del Aluminio

$S_y = 250 \text{ MPa}$, Límite de Fluencia del Acero

$$\frac{S_y}{N} = \sqrt{T_p^2} \quad \text{Ec. (8)}$$

$$N = \frac{90 \text{ MPa}}{\sigma_q}$$

Se obtiene un factor de seguridad de:

$$N = 20,35$$

Factor de seguridad en el Acero A36:

$$N = 56,53$$

Y para validar estos cálculos se presenta en la figura 42 y 43 el valor del factor de seguridad $N = 21$ y $N = 58,5$ del tornillo de sujeción en Aluminio y Acero A36 respectivamente analizado por el método de análisis de elementos finitos.

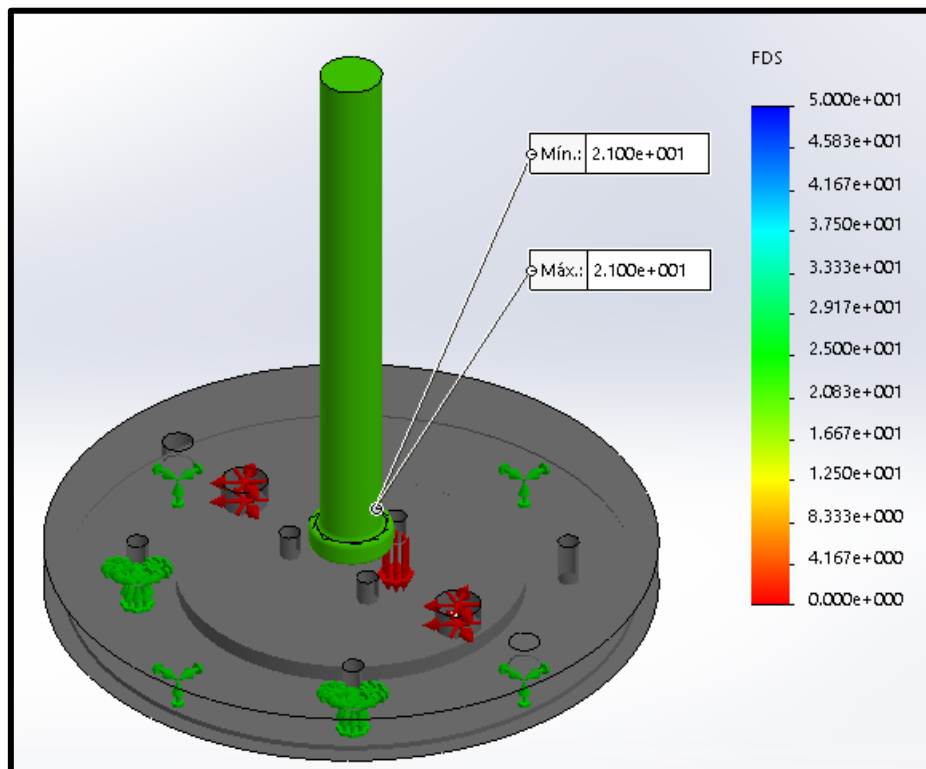


Figura 41. Factor de seguridad del tornillo de sujeción en Aluminio.

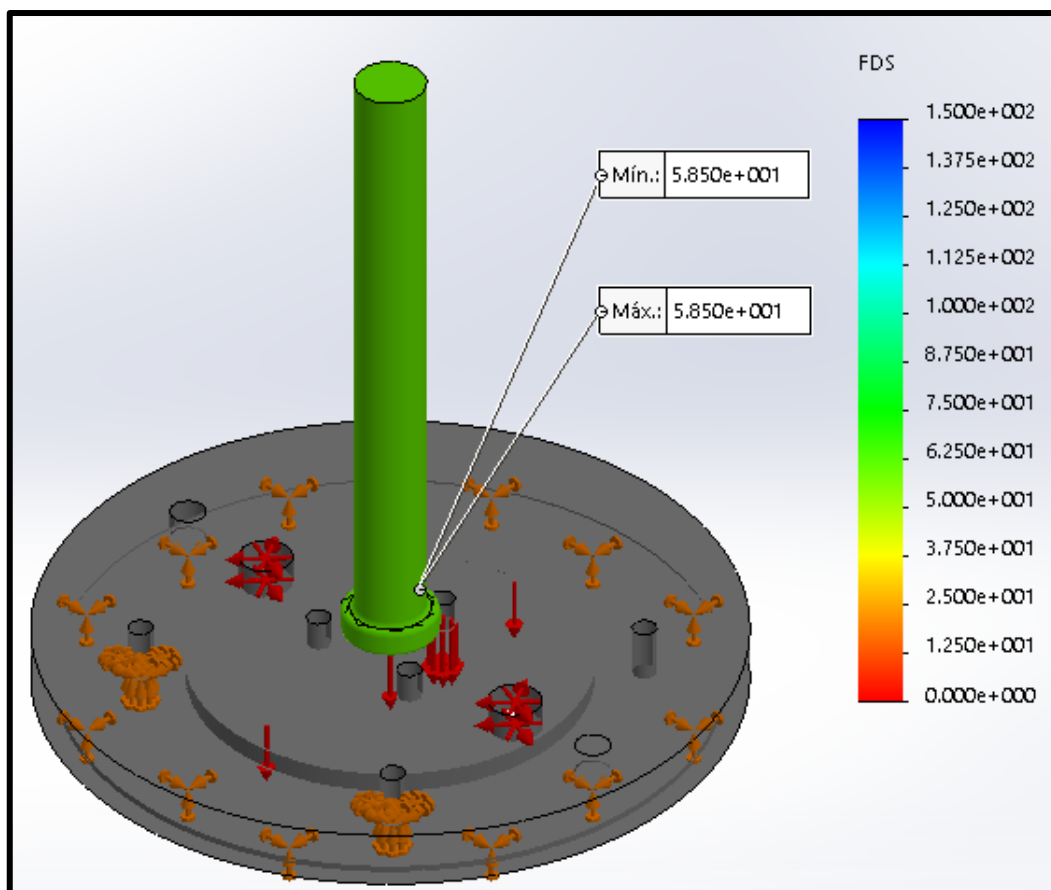


Figura 42. Factor de seguridad del tornillo de sujeción en Acero.

3.3.4. Automatización del sistema la Autoclave

Es la parte que se encarga de controlar el proceso de expansión de poliestireno en la autoclave; se tomará los datos de presión, tiempo y temperatura para encontrar los valores necesarios y obtener un molde con buen acabado superficial.

3.3.4.1. Componentes y materiales utilizados en el sistema de control.



En base a las pruebas experimentales, a los componentes que posee el usuario (válvulas de control de presión y tiempo establecidas para valores de 10-15 psi, 45-60 segundos, 130 °C) y conjuntamente con el caldero de 4 BHP; se debe definir el PLC que se encargará de la automatización del sistema de la autoclave.

3.3.4.1.1. Válvula de control de presión

Es una válvula que se utiliza para regular la presión de vapor en procesos industriales como autoclaves, vulcanizadores, etc. [22]. Tiene la función de ajustarse al flujo de vapor requerido, esto debido a la sensibilidad que presenta a los cambios de presión; sus ventajas son: fácil instalación y conexión, menor costo y sus desventajas son: disponibilidad en el mercado.

Tabla 11

Descripción de los componentes para el sistema de control.

Válvulas utilizadas en el sistema de control			
Nombre	Imagen	Descripción	Fabricante
Sensor transductor de presión absoluta		Señal de salida: digital, analógico 4-20 mA. Rango de presión: 25 bar (362,59 psi). Tipo de montaje: roscado sobre la tubería. Este componente es compacto y preciso al momento de censar los valores obtenidos. Alimentación: 24 V	WIKI Alexander Wiegand SE & Co. KG
Electroválvula proporcional Modular de 2 vías		Señal de salida: digital, analógico 4-20 mA o 0-10 V Presión nominal: PN20 (rango 150-300 psi). Tipo de montaje: roscado a la tubería. Alimentación: 24 V.	MARCA SET REF 2017, distribuida por STEFER LTDA.

En la tabla 11 se muestra 2 de los componentes que se encargarán de realizar la automatización de la presión del sistema de la autoclave; con las características de estos elementos se procede a realizar la selección del PLC, mediante a los parámetros de

presión, tiempo y temperatura, y en base a las entradas y salidas que necesito para lograr una automatización eficiente, precisa y exacta.

- Selección del PLC.

Tabla 12

Características de diferentes PLCs.

PLC SIEMENS		
Nombre	Diferencias	Ventajas y desventajas
PLC Siemens S7-200	Entradas digitales: Entre 6 – 14 dependiendo el número del CPU (221 tiene 6 entradas digitales). Salidas digitales: 10 Controladores PID: -8 Valor nominal de voltaje: 24 V	Sistema de automatización básico. Menor costo, eficiente y robusto.
PLC Siemens S7-1200	Entradas digitales: tiene 14 +2 sobre SB entradas Digitales. Salidas digitales: 10 + 2 sobre SB Controladores PID: 16 Valor nominal de voltaje: 24 V	Mayor costo, sistema de control avanzado, incompatibilidad del programa Tía portal con algunos sistemas operativos como Windows 10.
PLC Marca DELTA serie DVP-20SX2.	Entradas y salidas: 10 (4ED,2SD,2EA,2SA). Puertos de Comunicaciones, compatible con protocolo Modbus ASCII/RTU Entradas y salidas de 4-20 mA Valor nominal de voltaje: 24 V	Sistema de control avanzado, incluye HMI. Menor Costo, alto rendimiento,

En base a la tabla 12, se utilizará un PLC DELTA DVP Series 20SX2, debido a la limitada cantidad de entradas y salidas que se necesita para el proceso, una alimentación que trabaja a 24 V, entradas y salidas trabajan de 4 a 20 mA. En la figura 43 se indica el PLC que se usará.



Figura 43. PLC Marca DELTA serie DVP-20SX2.

3.3.4.2. Diseño de la automatización para el proceso de expansión en la autoclave

Para la automatización, se usó el método de diseño del Grafset, diagrama que sirve para representar un proceso en pasos secuenciales y condiciones cumpliendo un sistema lógico, contiene entradas que son las condiciones y salidas que son las acciones, las cuales muestran el modelo del proceso que se procederá a automatizar y permitirá diseñar un plano eléctrico con todos sus componentes.

3.3.4.3. Grafcet para el proceso de expansión

En la figura 44, se muestra el grafcet para el proceso de automatización en la autoclave.

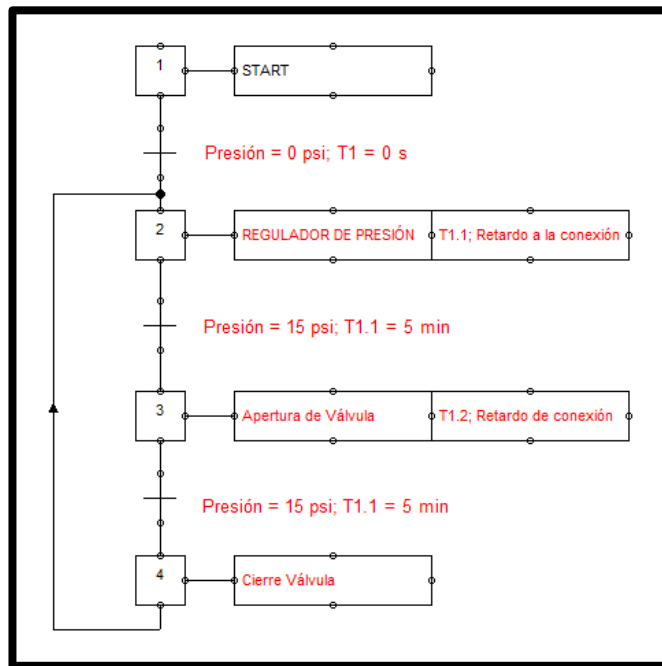


Figura 44. Grafcet para el sistema de la Autoclave.

Una vez realizado el Grafcet se procede a realizar la programación en lenguaje Ladder, este proceso facilita el proceso de sistematización debido a que está basado en esquemas eléctricos de automatización, comúnmente usados en los controladores lógicos programables (PLCs). Se define las variables del proceso, es decir, las entradas y salidas, antes de realizar la programación, esto se indica en la tabla 13.

Tabla 13

Nomenclatura de las variables para el diagrama de conexiones PLC Anexo 8.Br.

E/S	Componente	Descripción
DI IO.0	Paro de Emergencia	Entrada analógica del PLC.
AI V3+	Sensor de presión	Entrada analógica del PLC.
AO IO1	Electroválvula proporcional	Salida analógica del PLC.

Una vez establecidas las variables del proceso, se continúa el diseño para la automatización, con la programación en lenguaje Ladder.

La nomenclatura utilizada para el plano final junto con el diagrama de conexiones se muestra en la tabla 14, variables establecidas para la automatización del sistema de la autoclave representado por el Graficet ANEXO B (8, 9).

Para el acondicionamiento de los componentes en este caso el sensor (tiene una salida de 4 a 20 mA) y la electroválvula (tiene una entrada de 4 a 20 mA), se realizó un escalado y tratamiento de la señal analógica en base a los valores del rango de medición del sensor (presión 0 – 30 psi) y los valores de la electroválvula del sistema de control proporcional 4-20 mA para mover la bola de la válvula. El escalado se muestra en una función en el Anexo 10.B y la programación del sistema en el Anexo 11.B

Tabla 14

Nomenclatura de las variables para el diagrama de conexiones. (Anexo B).

Nombre	Componente	Descripción
S1	Sensor de presión	Sensor transductor con salida digital
E	Paro de emergencia	Botón de emergencia
E. V	Electroválvula	Electroválvula solenoide

3.3.5. Dinámica de Fluidos computacional (CFD)

Para comprobar la eficiencia de los 120 agujeros diseñados y la distribución del vapor dentro del molde junto con los parámetros encontrados previamente, se realiza un análisis de fluidos mediante la simulación numérica (método de volúmenes finitos) de la Dinámica de Fluidos Computacional con sus siglas en inglés CFD (Computational Fluid Dynamics), donde, se analiza el comportamiento del vapor de agua, es decir el flujo del vapor dentro del molde, usando el complemento de SOLIDWORKS® Flow Simulation.

Para el análisis del flujo de vapor, primero se debe calcular el caudal que se encuentra en el molde y la velocidad a la que está moviéndose el mismo. Para calcular el caudal se y la velocidad se sigue el siguiente procedimiento.

Nota: Los datos y las fórmulas se obtuvieron de las tablas del libro de Termodinámica de los autores Yunus A. Cengel y Michael A. Boles [23].

W_s = Caudal del vapor, kg/h;

M = masa del material a calentar, kg;

C_p = Calor específico del fluido, kJ/kg*°C;

Δt = Incremento de temperatura, °C;

h_{fg} = entalpía de evaporización del vapor, kJ/kg;

h = tiempo disponible, horas

V = Volumen específico, m^3/kg

d = Diámetro interno molde, m

Datos:

$M = 0,0145$ kg (Masa de los pellets de EPS utilizados para el molde de piñón cónico)

$C_p = 4,19$ kJ/kg · °C ()

$\Delta t = 130$ °C temperatura a la que trabaja el vapor a 15 psi

$h_{fg} = 2256,23$ kJ/kg

$h = 0,0125$ h (45 segundos)

$V = 1,673$ m^3/kg

$d = 0,1$ m

Cálculos:

- Caudal del vapor (ω_s), ecuación 9.

$$\omega_s = \frac{M \cdot c_p \cdot \Delta t}{h_{fg} \cdot h} \quad \text{Ec. (9)}$$

$$\omega_s = 0,2837 \text{ kg/h}$$

- Velocidad del vapor (v), ecuación 10

$$\omega_s = 3600 \cdot \pi \cdot \frac{v}{V} \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad \text{Ec. (10)}$$

$$\omega_s = 0,0077 \frac{m}{s} = 0,303 \frac{in}{s}$$

Con los resultados del caudal del vapor y la velocidad, datos necesarios para ingresar en el análisis de fluidos CFD del software, se procede a realizar el método para el cálculo por computador de la distribución del vapor por todo el molde experimental del piñón cónico, así como se observa en la figura 46 y 47.

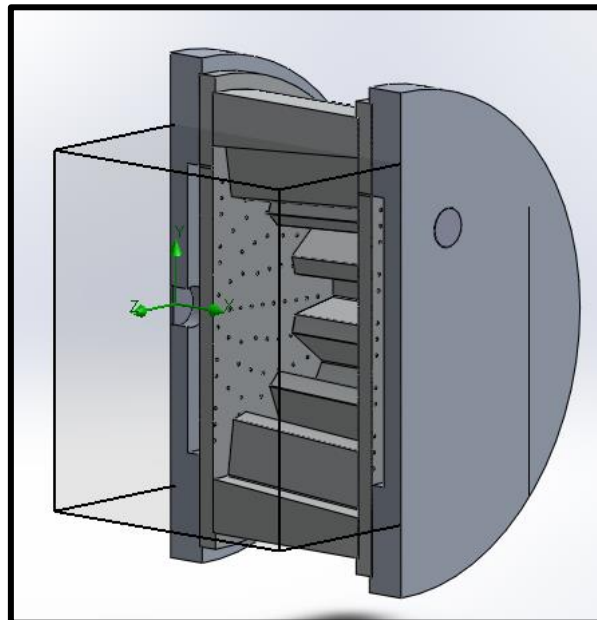


Figura 45. Vista de sección del molde sellado para el Análisis CFD.

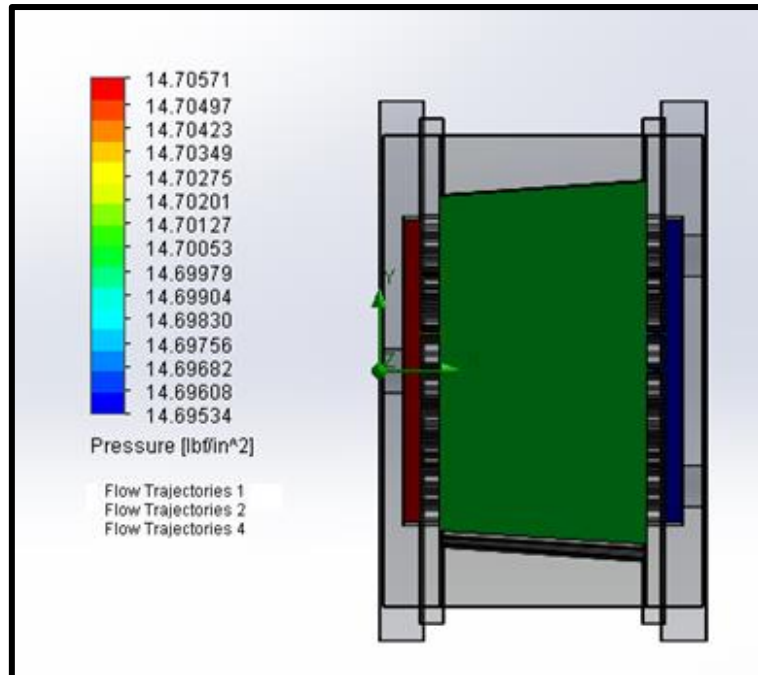


Figura 46. Análisis CFD simulado en SOLIDWORKS®.

3.3.6. Necesidades y materiales de los moldes y las piezas para el proceso de expansión de poliestireno

3.3.6.1. Alimentación y distribución de vapor

La fuente de energía para este proceso es el vapor de agua, el estado en el que se encuentra debe considerarse sumamente importante para obtener piezas en EPS con excelente calidad y buenas características, para este proceso hay que considerar el vapor de agua a usar para la transformación del poliestireno.

3.3.6.2. Caldero de vapor a utilizarse.

El caldero que se utilizará para el proceso de pre-expansión y expansión final (perteneciente al Laboratorio de fundición de la Escuela Politécnica Nacional) de poliestireno en el molde del piñón cónico, es un caldero de marca ELECON, este trabaja a una potencia de 4 BHP (1 BHP equivale a $33471,40 \text{ BTU por hora, } \frac{\text{BTU}}{\text{h}}$), para encender este caldero es necesario conectar una manguera de agua y una de gas (GLP), se debe colocar el control de la bomba en automático, y hay que visualizar el nivel del agua en el medidor que se encuentra al lado derecho del caldero, figura 47.

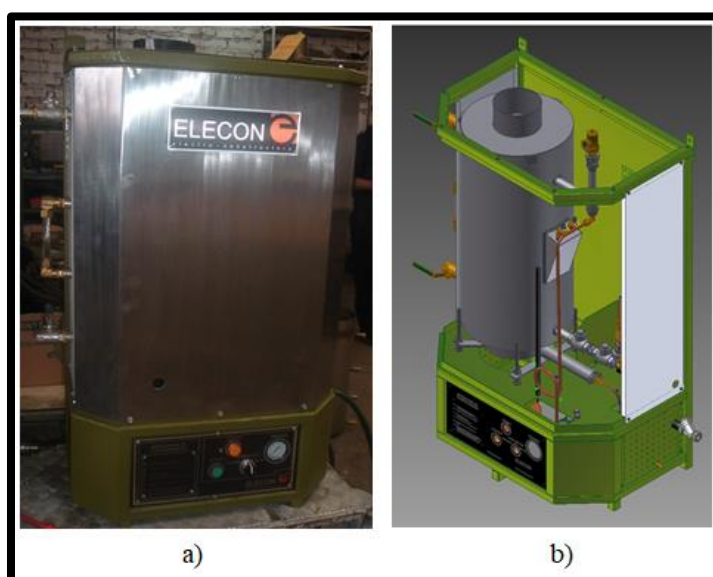


Figura 47. Caldero marca ELECON ubicado en el laboratorio de fundición de la EPN, a) Caldero de 4 BHP de potencia b) Diseño de caldero en 3D.

3.3.6.3. Características del vapor a utilizarse

Se necesita que el vapor sea ligeramente húmedo (1% de vapor), con una alta calidad para expandir el EPS, si la humedad llega a la pre-expansión (primeros segundos del proceso), el vapor deteriora la transmisión del calor a las perlas de poliestireno y por ende su expansión y su capacidad de deslizamiento.

La velocidad del vapor puede llegar a valores superiores a los 40 m/s, por lo tanto, se debe eliminar el condensado y las pausas mediante una instalación correcta y hermética.

Una vez encendido el caldero, ubicada la manguera a la salida de este, el vapor debe regularse bajando su presión para aprovechar el calor latente de evaporación, seguidamente de la válvula que regulará el paso (trampa de vapor), una manguera SAE 100 R1 (presión de trabajo máximo de la manguera de es 2250 psi), como se muestra en la figura 48, con acople rápido que se comunica hacia ensamblaje con el molde, estableciendo el sistema de autoclave.



Figura 48. Manguera SAE 100 R1

Capítulo IV.

4. Pruebas y Resultados

4.1. Ensayo N.º 1 para la obtención de un piñón cónico en EPS usando una Autoclave

4.1.1. Objetivo

Obtener piezas en Poliestireno Expandido (EPS) a partir de un molde patrón de piñón cónico mediante el uso de un sistema de Autoclave y analizar los parámetros de presión, tiempo y temperatura.

4.1.2. Materiales

- Autoclave
- 17 g de perlas de EPS (densidad del EPS de 18 a 22 kg/m^3)
- Caldero de vapor (para este ensayo se usó un caldero de 4 BHP); el vapor debe ser saturado (1 – 1,5 % de humedad) y seco.
- Molde Patrón de Piñón Cónico
- Balanza digital
- Manómetro
- Válvula Reguladora de vapor
- Guantes de seguridad
- Mandil de protección

4.1.3. Procedimiento

Para verificar el correcto funcionamiento de la autoclave se realiza las siguientes actividades.

1. Colocar las válvulas y el manómetro en la salida del caldero y conectar con la autoclave.
2. Suministrar de energía eléctrica y agua el caldero para encenderlo
3. Ubicar el molde en la Autoclave.
4. Ubicar los 17 g de perlas de EPS en el molde, figura 49.



Figura 49. Llenado del molde con perlas de EPS.

5. Sellamos y apretamos el molde con el mecanismo de la autoclave.
6. Abrir las Válvulas, regular y verificar en el manómetro que la presión se encuentre en 12 psi.
7. Tomar el tiempo durante 10 segundos.
8. Cerrar válvula y Enfriar la pieza dentro del molde durante 120 segundos.
9. Aflojar el mecanismo de la autoclave.
10. Retirar el molde usando Guantes de Seguridad.
11. Retirar la pieza de piñón cónico y observar los detalles (Acabado superficial, cohesión y compactación).
12. Medir en la balanza digital el peso de la pieza final.

4.1.4. Esquema del ensayo

En la figura 50 se puede visualizar el esquema del ensayo para el procedimiento de la obtención de piezas en EPS usando la Autoclave.

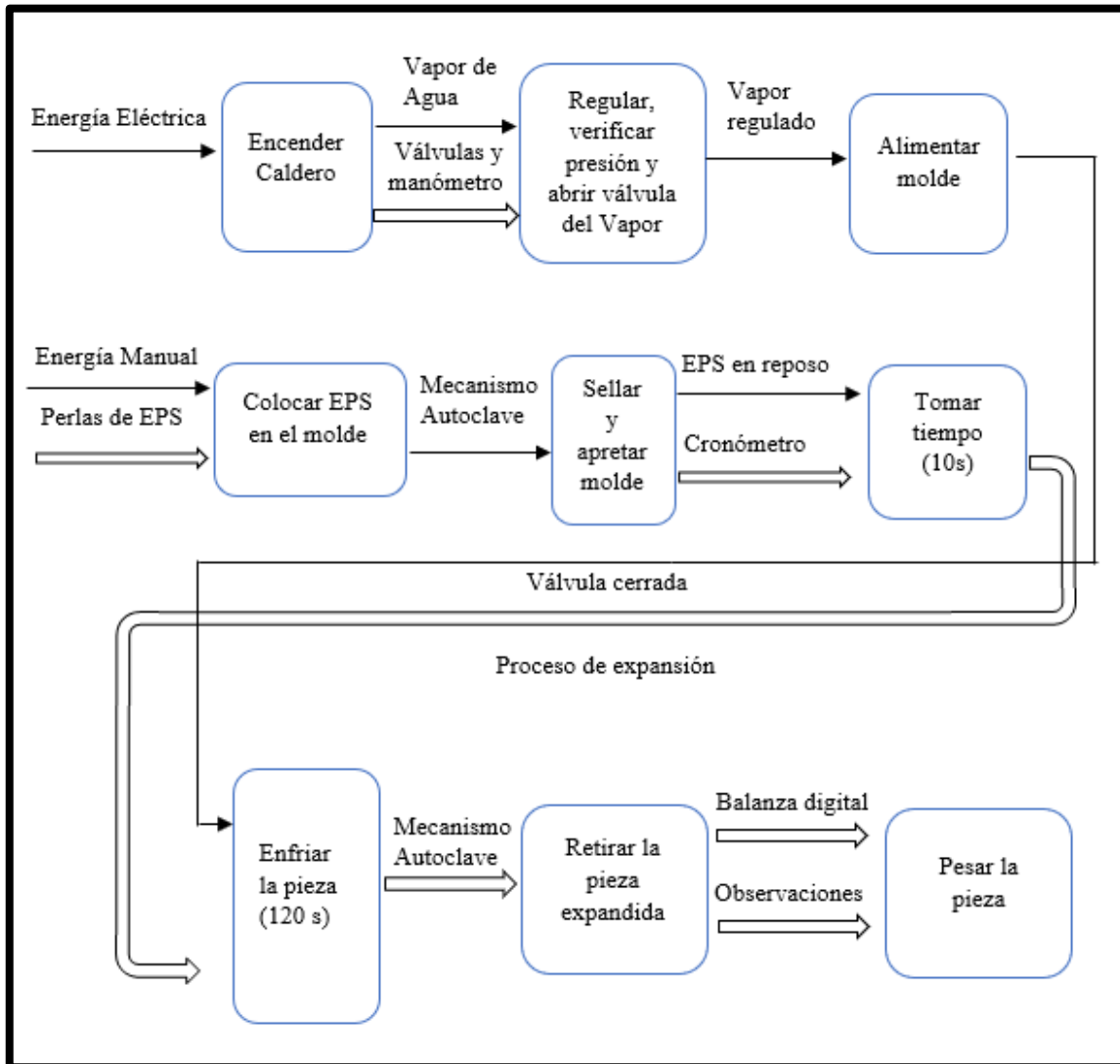


Figura 50. Esquema del ensayo de funcionamiento de la Autoclave.

4.1.5. Resultados

En la figura 51 se muestra la pieza expandida del piñón cónico del primer ensayo.



Figura 51. Ensayo 1 - piñón cónico en EPS.

Tabla 15

Valores de los parámetros del ensayo 1.

N°	P1	Δt	ΔP	ΔT	P2
	(g)	(s)	(psi)	(°C)	(g)
1	17	10	12	125	17,35

Se establece una notación en los ensayos para analizar el acabado superficial, la compactación y la cohesión de las perlas con el molde de piñón cónico, en donde: **M** es malo, **R** es regular, **B** es bueno, **MB** es muy bueno y **E** es excelente.

Tabla 16

Características de la pieza en EPS para el ensayo 1.

N°	Características			OBSERVACIONES
	Compactación	Cohesión	Acabado Superficial	
1	M	M	M	Muy poco tiempo, superficie rugosa

4.1.6. Conclusiones del ensayo 1.

En el primer ensayo, con los parámetros establecidos en la tabla 16, se obtuvo una pieza defectuosa con una mala cohesión, compactación y acabado superficial, notación establecida para analizar las características mencionadas en la tabla 15.

4.1.7. Ensayo N.º 2 – N.º 11

Para realizar los ensayos 2 al 11 se utiliza el mismo procedimiento usado en el ensayo 1, pero editando los parámetros de presión, tiempo y temperatura, con el objetivo de mejorar las características de cada pieza hasta encontrar las variables adecuadas para una pieza con acabado superficial, cohesión y compactación excelente.

4.1.8. Resultados de los ensayos 2 al 11.





Tabla 17






Valores de los parámetros de los ensayos 2 al 11.

Nº	P1 (g)	Δt (s)	ΔP (psi)	ΔT (°C)	P2 (g)
2	18	20	12	125	18,25
3	18	30	20	130	18,28
4	18,5	20	14,5	130	18,62
5	17	25	14,5	130	17,22
6	16	30	14,5	130	16,18
7	15	30	14,5	130	15,10
8	14,5	30	14,5	130	14,69
9	14,5	40	15	130	14,71
10	14,5	35	14,5	130	14,62
11	14,5	30	14,5	130	14,64

Tabla 18

Características de las piezas en EPS para los ensayos 2 al 11.

N°	Características			OBSERVACIONES	Imagen de cada ensayo
	Compact.	Cohesión	Acabado Superficial		
2	M	M	M	Muy poco tiempo, superficie rugosa con rebabas	
3	M	R	R	Material mal distribuido, se quemó	
4	R	B	R	Material mal distribuido, no se llenó el molde	
5	B	MB	B	Hizo falta enfriar, tiene una mínima cantidad de rebabas	

6	MB	MB	MB	Figura estable, más tiempo de enfriamiento	
7	MB	MB	MB	Material lleno al ras del molde	
8	E	E	E	Buen acabado, se llena al ras del molde	
9	MB	E	E	Se llena al ras del molde	
10	E	E	E	Buen acabado, se llena al ras del molde	

11	E	E	E	Buen acabado, se llena al ras del molde
----	---	---	---	---



4.1.9. Conclusiones de los ensayos 2 al 11.

Con los resultados obtenidos en las tablas 17 y 18 se pudo demostrar que, los parámetros necesarios para obtener una compactación, cohesión y un acabado superficial excelente en cada pieza de piñón cónico en EPS son los siguientes: una presión 14,5 psi, tiempo 30-45 segundos y una temperatura de 125-130 °C; así como se observa en las imágenes de los ensayos 9, 10 y 11 de la tabla 18.

4.2. Ensayo N.º 1 para visualizar la parte interna y los dientes de las piezas en EPS del piñón cónico utilizando un Microscopio.

4.2.1. Objetivo

Visualizar con un Microscopio la parte interna y los dientes de la pieza 1 en EPS, analizar los parámetros de presión, tiempo y temperatura para las características de compactación, cohesión y vacancias.

4.2.2. Materiales

- Microscopio (Para este procedimiento se utilizó un Microscopio digital Shunshine “DM-1000S”) con su respectiva regla
- Computador
- Cúter
- Tabla de madera

4.2.3. Procedimiento

1. Encender Computador.
2. Realizar un corte transversal (por la mitad) a la pieza en EPS del ensayo 1 del piñón cónico.
3. Conectar el microscopio (entrada USB del computador)
4. Ubicar la pieza cortada en la base de madera de tal manera que el corte transversal sea paralelo al lente del microscopio.
5. Visualizar la imagen en el computador y calibrar el microscopio.
6. Realizar las medidas correspondientes en el programa del microscopio en el computador.
7. Tomar una fotografía con el microscopio.

4.2.4. Esquema del Ensayo

En la figura 52 se muestra el esquema del procedimiento para el ensayo 1.

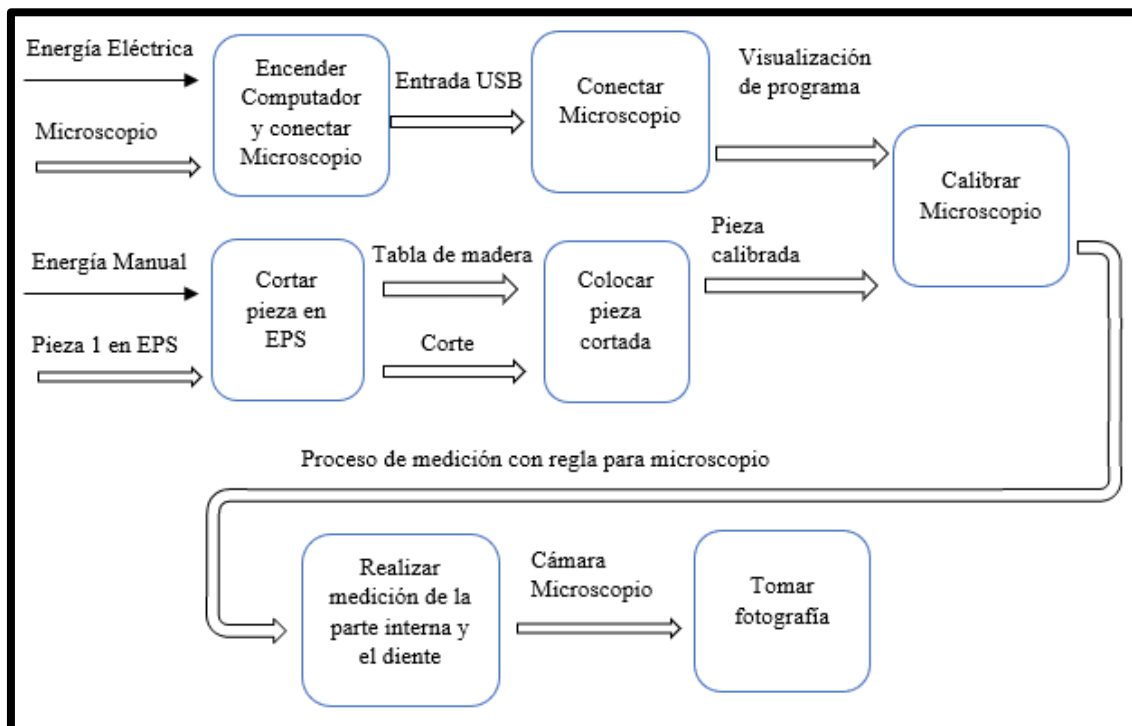


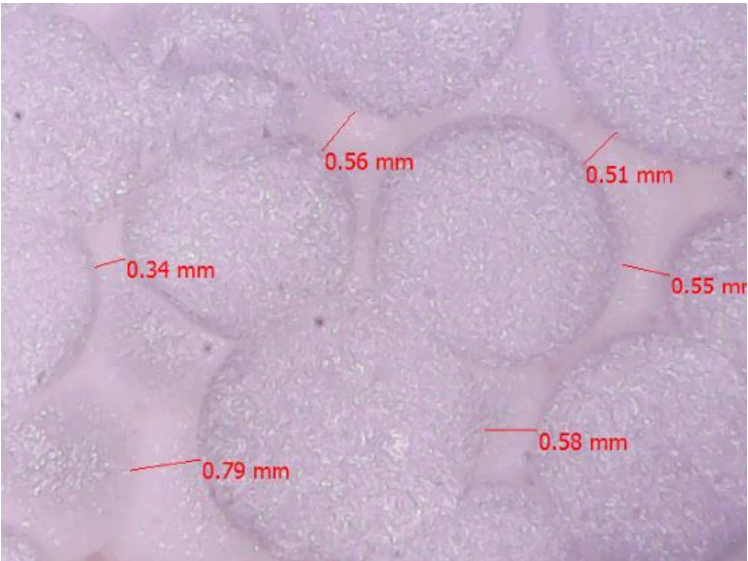
Figura 52. Esquema del ensayo 1 utilizando un microscopio.

4.2.5. Resultados del Ensayo 1

En la tabla 19 se indica la distancia promedio que existen entre perla en el corte (X_c) y en el diente (X_d) obtenidas en el microscopio junto las características mostradas en las del ensayo 1.

Tabla 19

Valores de distancia promedio entre perlas del corte y del diente para el ensayo 1.

N°	X_c (mm)	X_d (mm)	Imágenes del corte y diente visualizadas con el microscopio
1	0,55	1,37	



4.2.6. Conclusiones del primer ensayo.

Para el ensayo 1 se observa en las imágenes de la tabla 19 que las características para el corte y el diente son de mala calidad y ya que la distancia promedio mínima entre perlas es de 0,55 mm y 1,37 mm respectivamente.

4.2.7. Ensayos de la pieza 2 a la 11

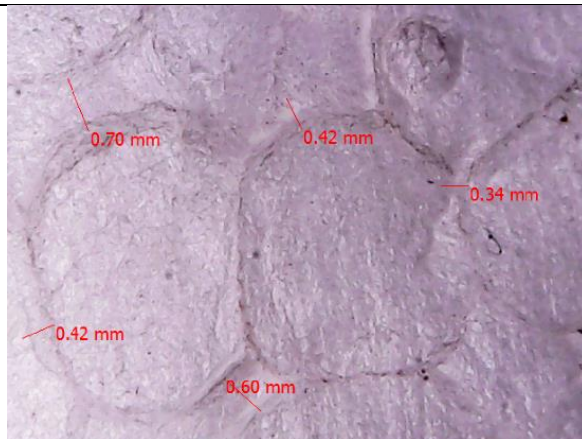
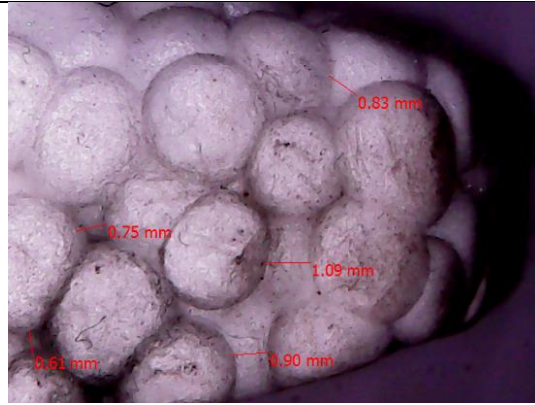
Para realizar los ensayos 2 al 11 se visualiza con el microscopio las características en cada pieza utilizando el mismo procedimiento del ensayo 1, con el objetivo de lograr observar corte interno y del diente a un nivel microscópico y así poder establecer los parámetros de presión, tiempo y temperatura; para lograr una pieza con acabado excelente.

4.2.8. Resultados de los ensayos 2 al 11

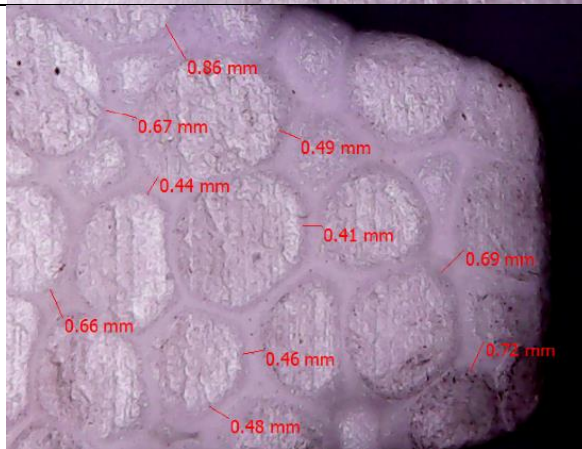
Tabla 20

Valores de distancia promedio entre perlas del corte y del diente entre perlas para los ensayos 2 al 11.

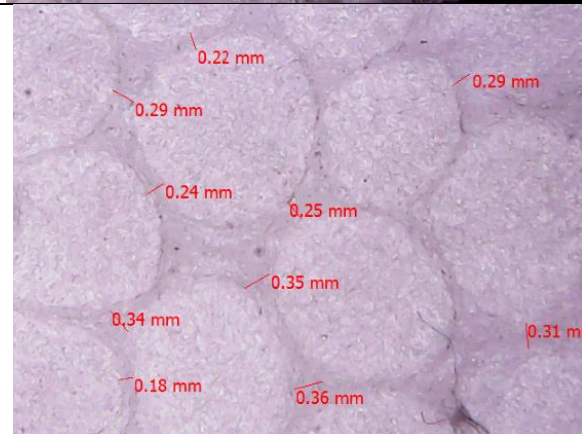
N°	Xc (mm)	Xd (mm)	Imágenes del corte y diente visualizadas con el microscopio
2	0,43	0,92	
3	0,46	0,84	

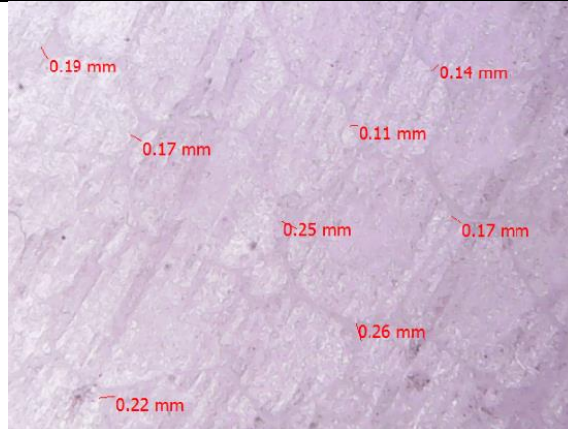
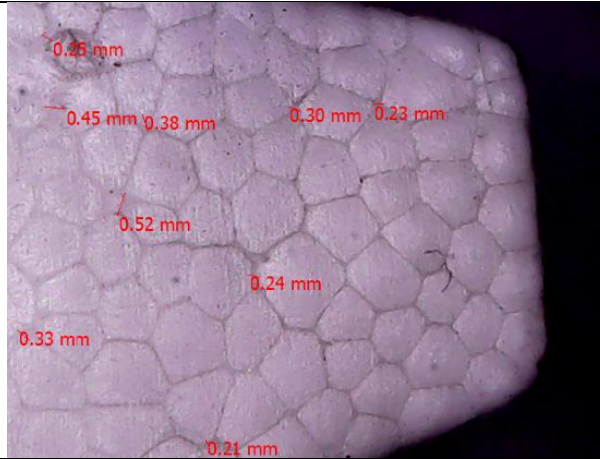


4 0.5 0,70

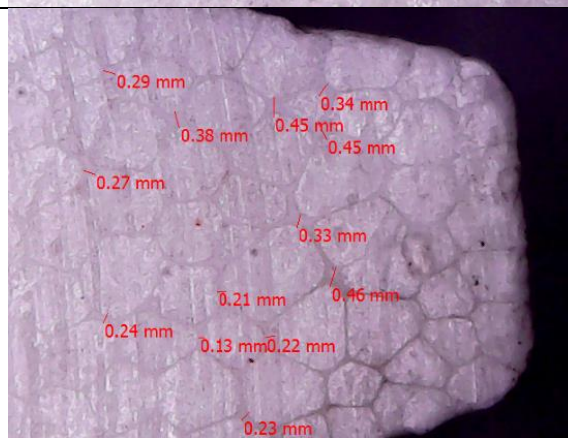


5 0,33 0,324

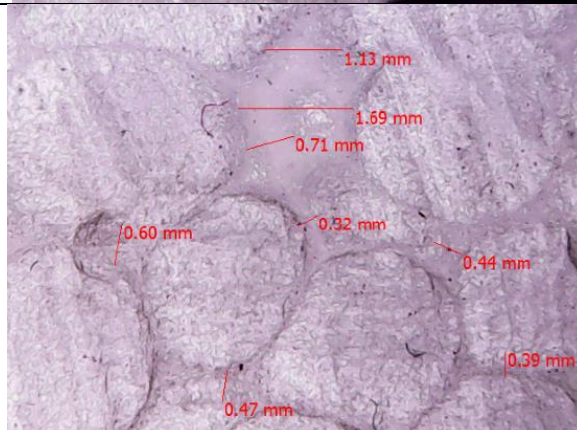


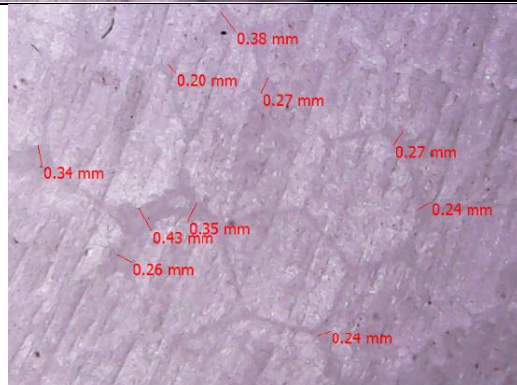
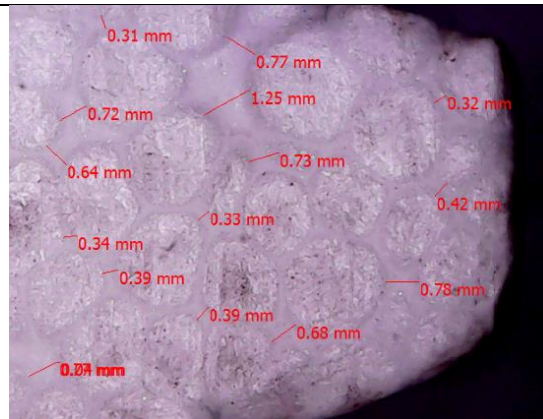


6 0,29 0,34

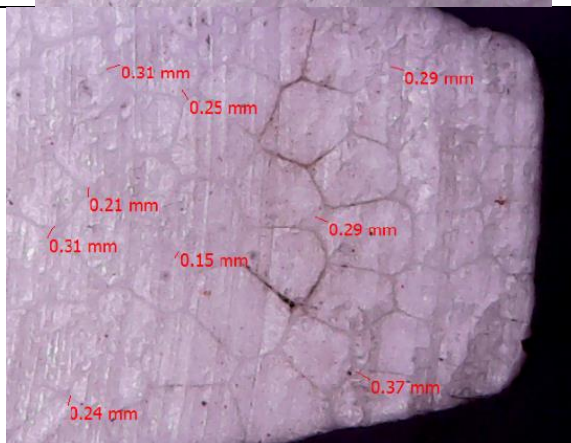


7 0,37 0,338

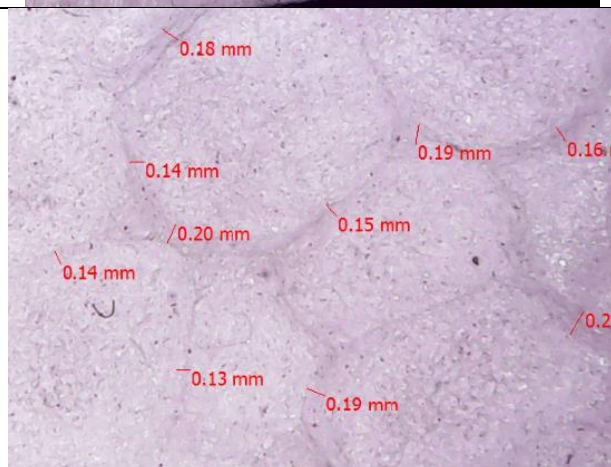


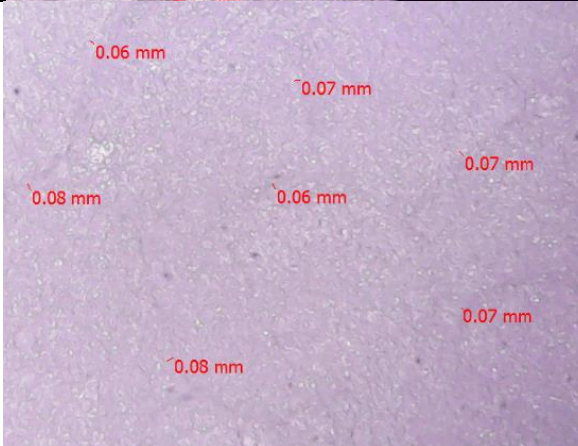
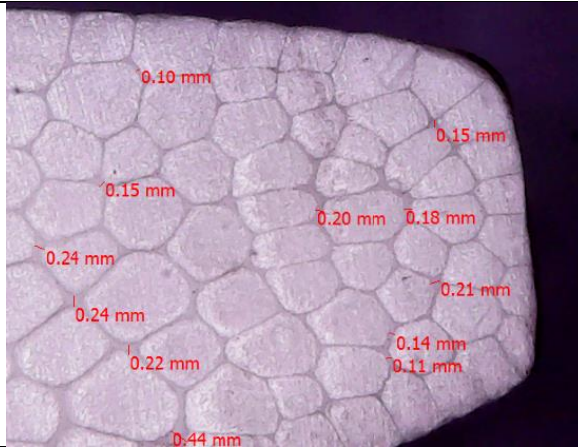


8 0,32 0,268

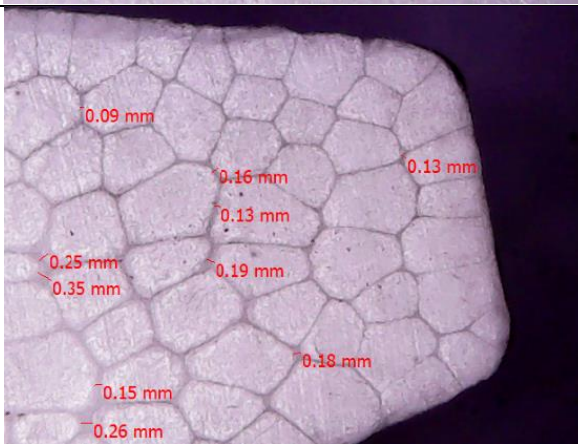


9 0,162 0,156

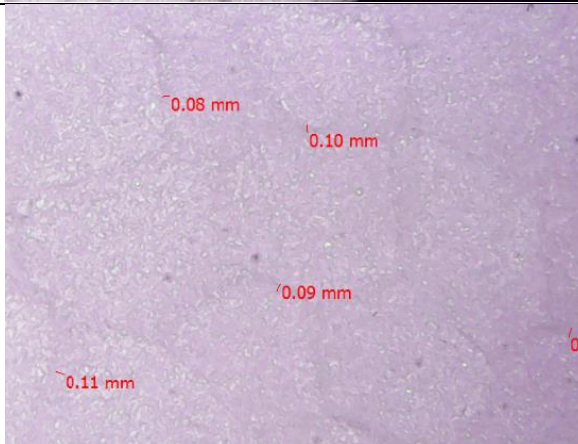


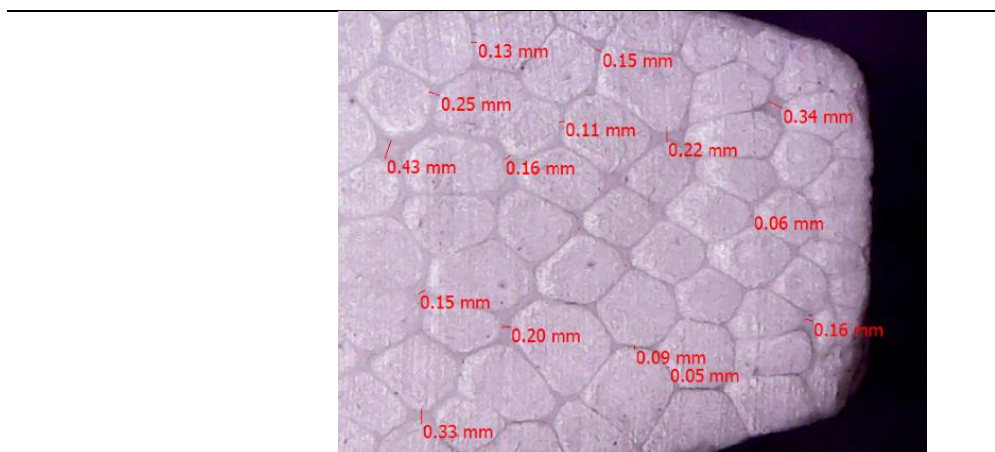


10 0,06 0,156



11 0,08 0,151





4.2.9. Conclusiones de los ensayos 2 al 11.

Se pudo obtener una compactación mínima para el corte de 0,07 mm y para el diente de 0,154 mm con los valores en los parámetros de presión, tiempo y temperatura de: 14,5 psi, 40 segundos y 130 °C respectivamente; logrando una pieza con características excelentes, y resultados satisfactorios.

4.2.10. Curva de parámetros y enfriamiento de los ensayos.

En la figura 53 se puede observar que las curvas son ligeramente constantes, debido a que sus parámetros han sido evaluados en base a los resultados finales (tabla 21) realizados en el protocolo de pruebas y se ha llegado a resultados favorables de acabado superficial y resistencia a la compresión para este sistema de una autoclave.

Tabla 21

Resultados finales de los parámetros para obtener piezas con características satisfactorias.

PARÁMETROS	CARACTERÍSTICA
Presión	14,5 (psi) – 1 (bar)
Tiempo	40 (s)
Temperatura	120 - 130 (°C)

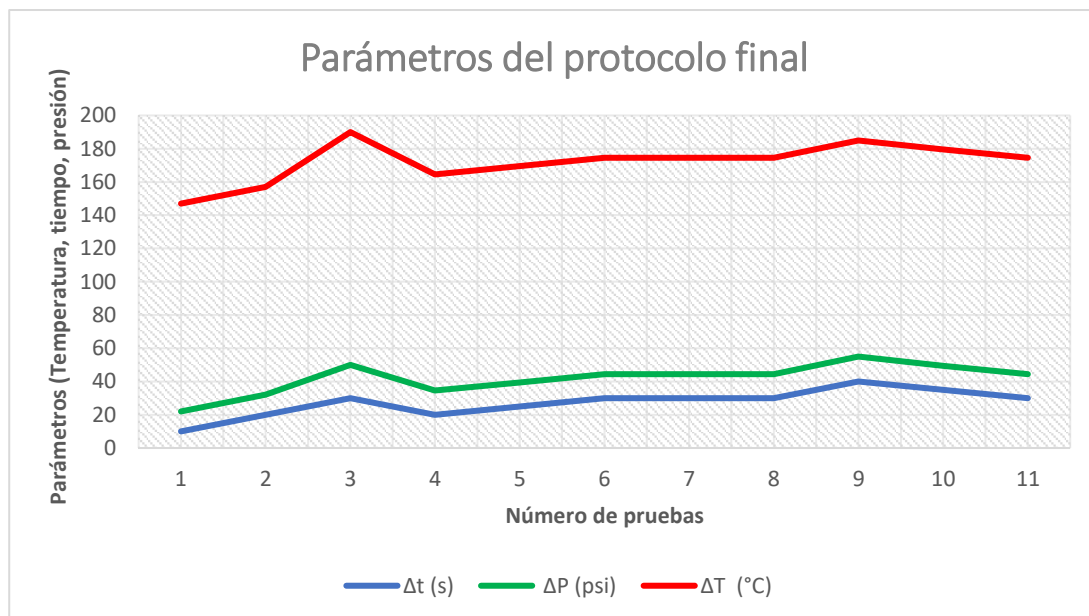


Figura 53. Curvas de parámetros de tiempo, presión y temperatura, tomados de la tabla 19.

Así mismo para verificar la temperatura se utilizó una termocupla tipo K, está la ubicamos en la parte inferior del molde patrón, en donde tendría contacto directo con el vapor, en la tabla 22, se encuentran los valores de temperatura obtenidos en determinados tiempos.

Tabla 22

Prueba de calentamiento con termocupla tipo K.

Termocupla tipo k		
Lectura	Tiempo	Temperatura
N°	(s)	(°C)
1	5	35
2	10	119
3	15	126
4	20	128
5	25	128
6	30	129
7	35	127
8	40	126
9	45	129
10	50	130
11	55	128
12	60	127

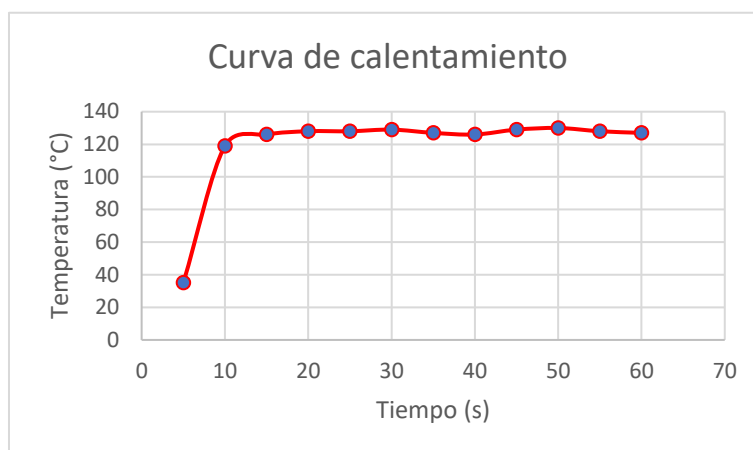


Figura 54. Curva de calentamiento, temperatura vs tiempo.

En la figura 54, se observa la curva de calentamiento, al estar la termocupla en contacto directo con el vapor se genera un salto brusco de temperatura, pero constante, cabe recalcar, que no fue necesario realizar un control de temperatura, ya que, al permanecer con una presión constante, la temperatura no se ve afectada y la pieza final, cumple los objetivos propuestos.

Una de las formas alternativas para reducir el tiempo de enfriamiento del molde patrón es aplicando un chorro continuo de 500 cm^3 de agua a temperatura ambiente, este proceso se lleva a cabo, una vez terminado el tiempo de expansión, inmediatamente se agrega el agua y aproximadamente en un rango de 30 a 40 segundos, se puede retirar el molde con guantes de seguridad y desmontar la pieza expandida del piñón cónico.

Tabla 23

Prueba de enfriamiento con termocupla tipo K.

Termocupla tipo k		
Lectura	Tiempo	Temperatura
N°	(s)	(°C)
1	5	61
2	10	48
3	15	37
4	20	35
5	25	29
6	30	28
7	35	26
8	40	23
9	45	21
10	50	21
11	55	19
12	60	19

Se realizó pruebas para determinar el tiempo de enfriamiento usando la termocupla tipo K, en la tabla 23 y figura 55, se observan los valores de temperatura obtenidos en determinados tiempos, mediante este ensayo se pudo obtener el tiempo de enfriamiento, es decir que, la temperatura del molde patrón se estabiliza al pasar 115 segundos, llegando aproximadamente a 20 °C y proceder con la expansión de la siguiente pieza.

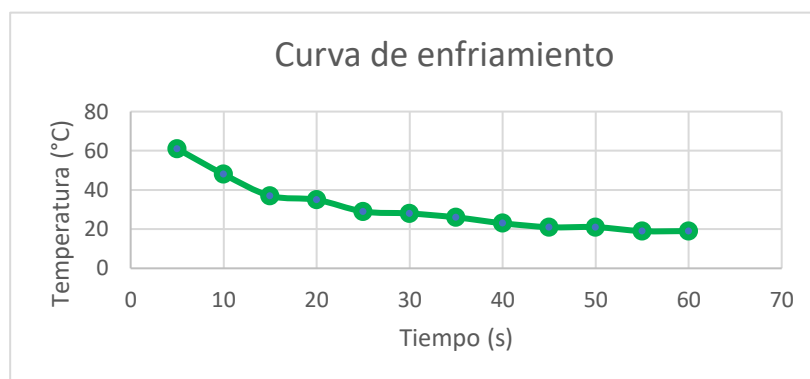


Figura 55. Curva de enfriamiento del proceso de expansión.

En el presente trabajo de grado se muestran los resultados en base a los objetivos planteados, así como las pruebas y el diseño de detalle de la autoclave y el molde, detallado en la metodología.

Para el objetivo de la automatización se presenta el diseño de detalle de los componentes junto con los diagramas de conexión y la programación en lenguaje Ladder, para ser implementado en un futuro, esto debido a las circunstancias de la pandemia producidas durante el presente año.

Capítulo V.

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

- El diseño de la autoclave, es hermético, liviano y manejable; se adapta a cualquier superficie plana y cumple las funciones para el proceso de expansión de poliestireno.
- La materia prima utilizada para los ensayos de expansión generó los resultados esperados con relación a la aplicación de temperatura, presión y tiempo.
- El molde patrón elaborado en aluminio presenta características favorables para la expansión de poliestireno, por su resistencia a la presión y temperatura, por su peso y por la calidad final de la pieza expandida.
- El tiempo de exposición del material dentro del molde es proporcional a los valores de presión y temperatura.
- El peso adecuado para un acabado de calidad y consistencia utilizado en los ensayos de expansión con el molde del piñón cónico fue de 14,5 gramos de perlas de poliestireno expandido.
- Con una presión de 14,5 psi, un tiempo de 40 segundos y una temperatura de 130 °C, se pudo obtener una compactación mínima de 0,07 mm en la parte interna de la pieza y de 0,154 mm en la superficie del diente.
- Con los resultados obtenidos se pudo demostrar que el proceso de Expansión de poliestireno, es una alternativa viable para los procesos de fundición.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda para una futura investigación planificar la distribución del vapor en función de los dientes, para permitir una total compactación y cohesión de las perlas.
- Para futuras investigaciones o procesos de producción de moldes y elementos relacionados con maquinaria se recomienda el uso del aluminio, debido a su peso, resistencia, viabilidad y acabado de calidad.
- Se deben almacenar las perlas de EPS a una temperatura inferior a 25 °C y en recipientes o depósitos abiertos o bien sellados, para evitar que el material se deteriore.
- Para producción de moldes y piezas en EPS, se recomienda analizar sistemas de producción en serie.

Bibliografía

- [1] L. Foronda y O. Palacios, DISEÑO DE UN PROCESO DE FABRICACIÓN DE LÁMINAS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO EN LA PROVINCIA DE SANTA ELENA, Guayaquil, 2017.
- [2] E. C. d. I. J. Garavito, «Fundicion,» 2008. [En línea]. Available: https://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/9627_fundicion.pdf. [Último acceso: 14 Enero 2019].
- [3] A. Álvarez y M. Campos, Artists, *Obtención de piezas de aluminio mediante el proceso de colado con modelos de poliestireno expandido*. [Art]. ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, 2012.
- [4] S. Kalpakjian y S. Schmid, *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*, México: PEARSON EDUCACIÓN, 2008.
- [5] D. Sadovnik, Artist, *Diseño Conceptual y estudio de factibilidad de una autoclave a vapor basados en las necesidades del sistema de salud de Santiago de Cali*. [Art]. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE, 2016.
- [6] V. Gómez, Artist, *CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MATERIALES COMPUESTOS MANUFACTURADOS FUERA DE UNA AUTOCLAVE*. [Art]. POSGRADO INTERINSTITUCIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA, 2017.
- [7] H. Qin y C. Yin, «Study on Temperature and Pressure Control of Autoclave Based on FPGA,» de *3rd International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering*, Wuhan, 2018.
- [8] J. Ramos, «Slideshare,» 2011. [En línea]. Available: https://es.slideshare.net/elcrack_10jm/exposicion-autoclave. [Último acceso: 2019].
- [9] C. Mariana, Artist, *DISEÑO SUSTENTABLE PARA UNA AUTOCLAVE*. [Art]. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, 2014.
- [10] ANAPE, «ANAPE (Asociación Nacional de Poliestireno Expandido),» ANAPE, [En línea]. Available: <http://www.construccion-eps.com/index.php?accion=producto-propiedades>.
- [11] CIAP, «CENTRO DE INVESTIGACIONES APLICADAS A POLÍMEROS (CIAP),» 2010. [En línea]. Available: <https://www.epn.edu.ec/centro-de-investigaciones-aplicadas-a-polimeros-ciap/>. [Último acceso: Febrero 2019].
- [12] S. Fajardo, «POLIEXPANDIDOS,» POLIEXPANDIDOS, 2016. [En línea]. Available: <http://poliex.com.ec/>. [Último acceso: 06 2019].
- [13] H. Ortiz, Artist, *ESTUDIO DE LA INTERACCIÓN ENTRE EL PROCESO DE EXTRUSIÓN Y EL EPS*. [Art]. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, 2014.
- [14] Instituto Ecuatoriano de Normalización, «Servicio Ecuatoriano de Normalización,» 2014. [En línea]. Available: https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_iso_9229.pdf. [Último acceso: 2019].

- [15] C. Pila, Artist, *ESTUDIO DE LAS REACCIONES EN LA INTERCARA CERA CERÁMICO Y SU INFLUENCIA EN LOS ACABADOS EN LAS PIEZAS EN BRONCE OBTENIDAS POR EL MÉTODO A LA CERA PERDIDA Y, OBTENCIÓN DE LA IMAGEN DE LA MASCOTA DE LA INGENIERÍA MECÁNICA EN BRONCE POR EL MISMO MÉTODO*. [Art]. ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, 2010.
- [16] A. HANDBOOK, Metals Handbook - ASM Handbook, vol. 15, California: ASM International , 1998, p. 2003.
- [17] S. C. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, «ONNCE.ORG.MX,» 2009. [En línea]. Available: https://www.onnce.org.mx/es/?option=com_merchant&view=category&cid=7. [Último acceso: 2019].
- [18] DIPAC, «DIPAC,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.dipacmanta.com/vigas/vigas-upn>. [Último acceso: 2019].
- [19] T. Moreno, «Bibliotecas Udlap,» [En línea]. Available: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/moreno_t_am/capitulo3.pdf. [Último acceso: Febrero 2020].
- [20] A. Rojas, *DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN OPERADOR LOGÍSTICO EN TAREAS DE DISTRIBUCIÓN DE UN PRODUCTO DE COMERCIALIZACIÓN MASIVA*, Quito, 2015.
- [21] B. Ferdinand y J. Russell, *Mecánica de Materiales*, vol. 5, México: McGraw-Hill, 2010.
- [22] TLV, «TLV,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.tlv.com/global/LA/>. [Último acceso: 2020].
- [23] Y. Cengel y M. Boles, *Termodinámica*, México, D.F: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V, 2008.
- [24] J. Sanango y C. Sango, Artists, *DISEÑO DE UN MECANISMO DE APERTURA Y CIERRE DE UNA ESTRUCTURA ADAPTABLE PARA LA CÁMARA DE LA PEQUEÑA Y MEDIANA EMPRESA DE PICHINCHA UBICADA EN EL CENTRO DE EXPOSICIONES QUITO*. [Art]. ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL , 2015.
- [25] INDUMEI, «INDUMEI,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.indumei.com/maquinaria-concreto>. [Último acceso: 2019].
- [26] S. d. T. y. P. Social, «Secretaría del Trabajo y Previsión Social,» Secretaría del Trabajo y Previsión Social, 2009. [En línea]. Available: http://www.stps.gob.mx/bp/secciones/dgsst/publicaciones/prac_seg/prac_chap/PS%20invernaderos.pdf.
- [27] J. Ruano, Artist, *SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL PARA AUTONOMÍA DE ACCIÓN DEL ROBOT*. [Art]. Universidad Técnica del Norte, 2019.
- [28] F. Oviedo, M. Campos y A. Álvarez, «Revista Politécnica,» 31 07 2013. [En línea]. Available: https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/34/pdf. [Último acceso: 2019].

[29] Venamet, «Venamet,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.venamet.com/wp-content/uploads/2019/06/VMP.pdf>.

5.3. ANEXOS

5.3.1. ANEXO A (IMÁGENES)



Anexo 1. A. Fabricación del molde de piñón cónico.



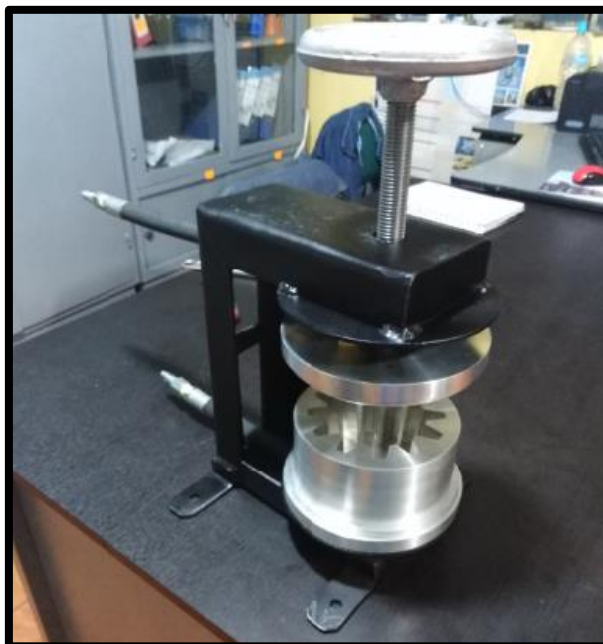
Anexo 2. A. Molde de piñón cónico terminado.



Anexo 3. A. Piñón cónico de concretera elaborado por un proceso de fundición convencional.



Anexo 4. A. Ensamblaje final de las piezas de la Autoclave y el caldero por medio de mangueras.



Anexo 5. A. Estructura y mecanismo de la Autoclave.

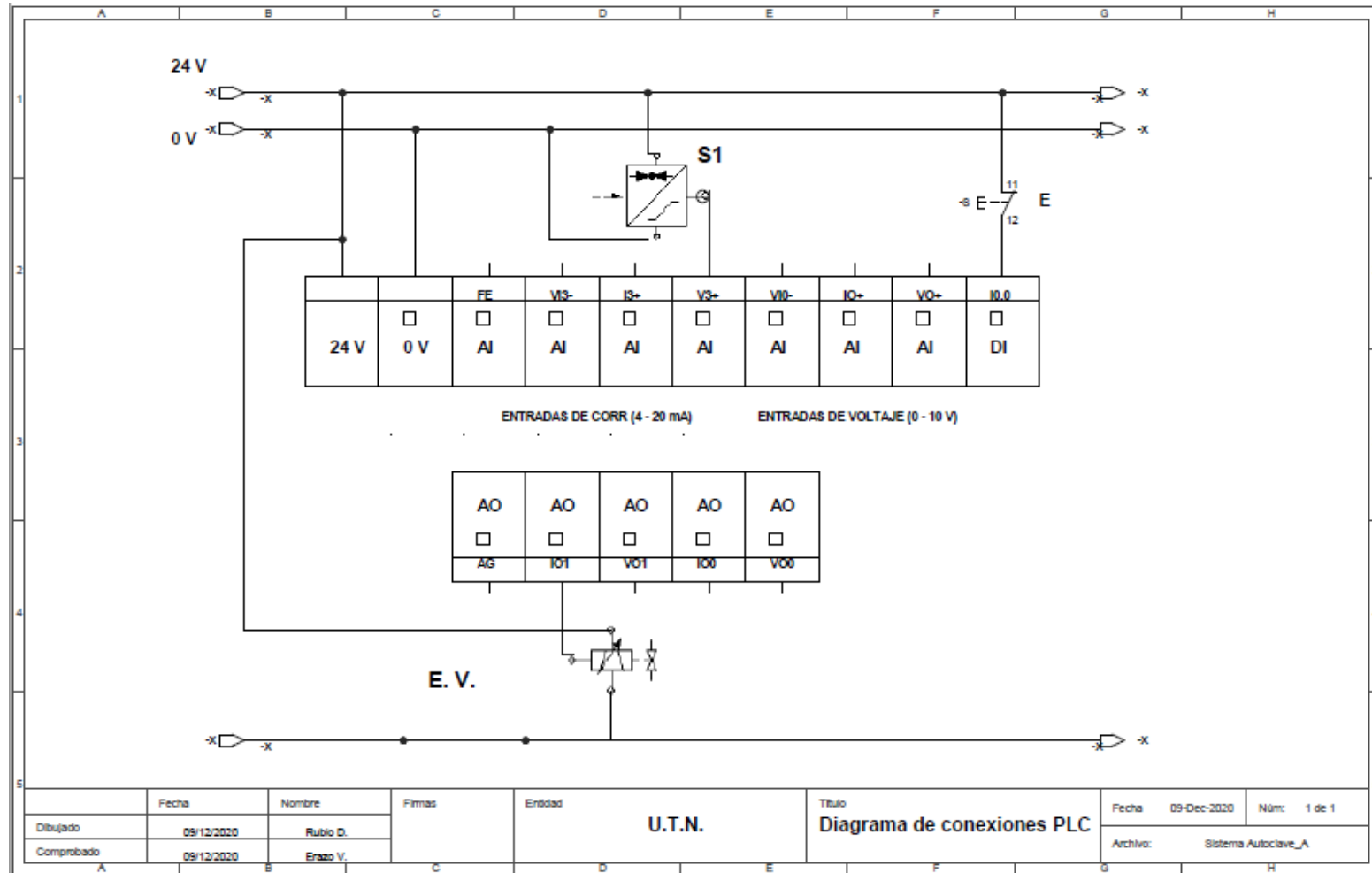


Anexo 6. A. Autoclave para expansión de poliestireno en molde de piñón cónico.

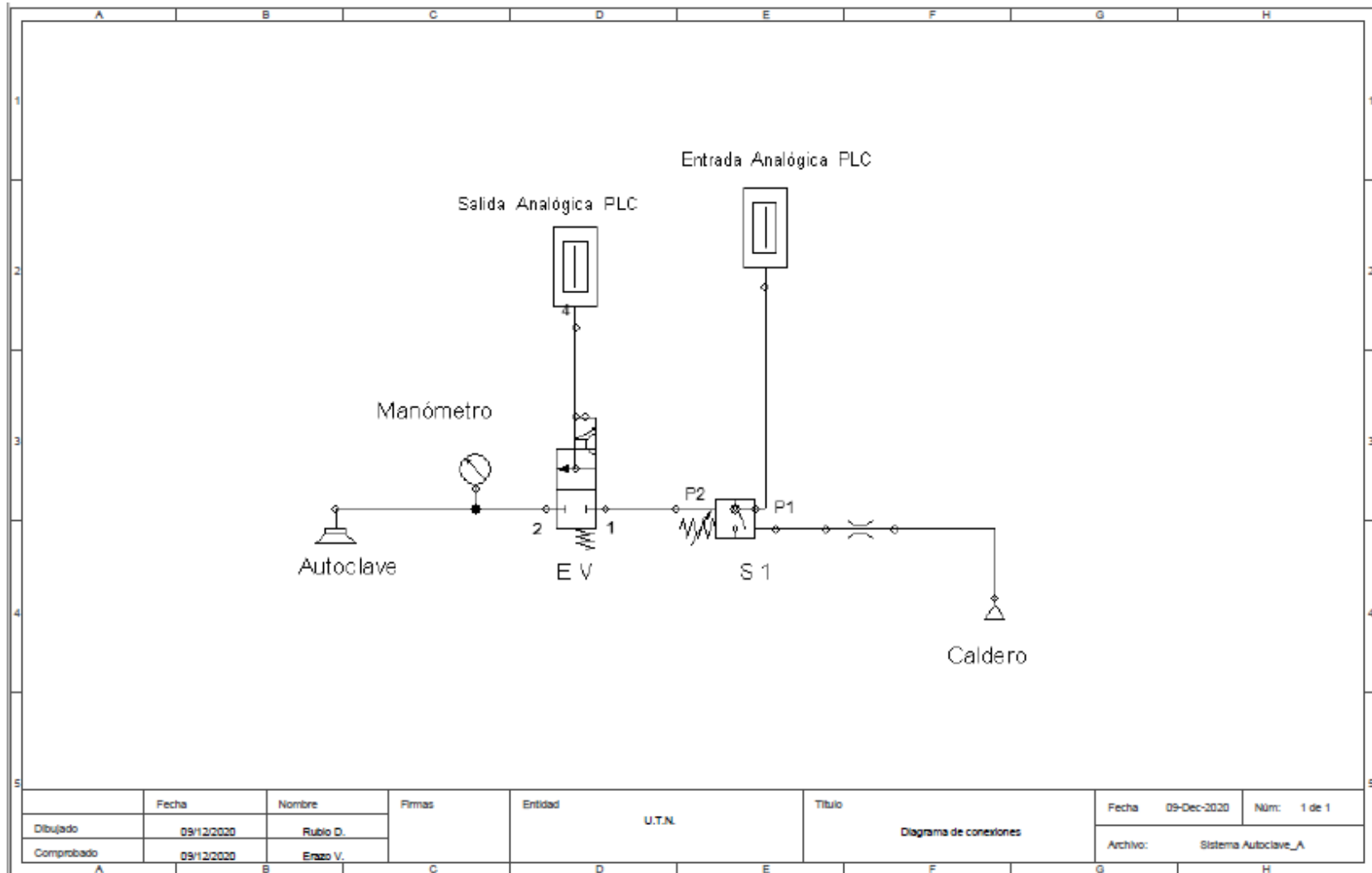


Anexo 7. A. Pieza en EPS dentro del molde.

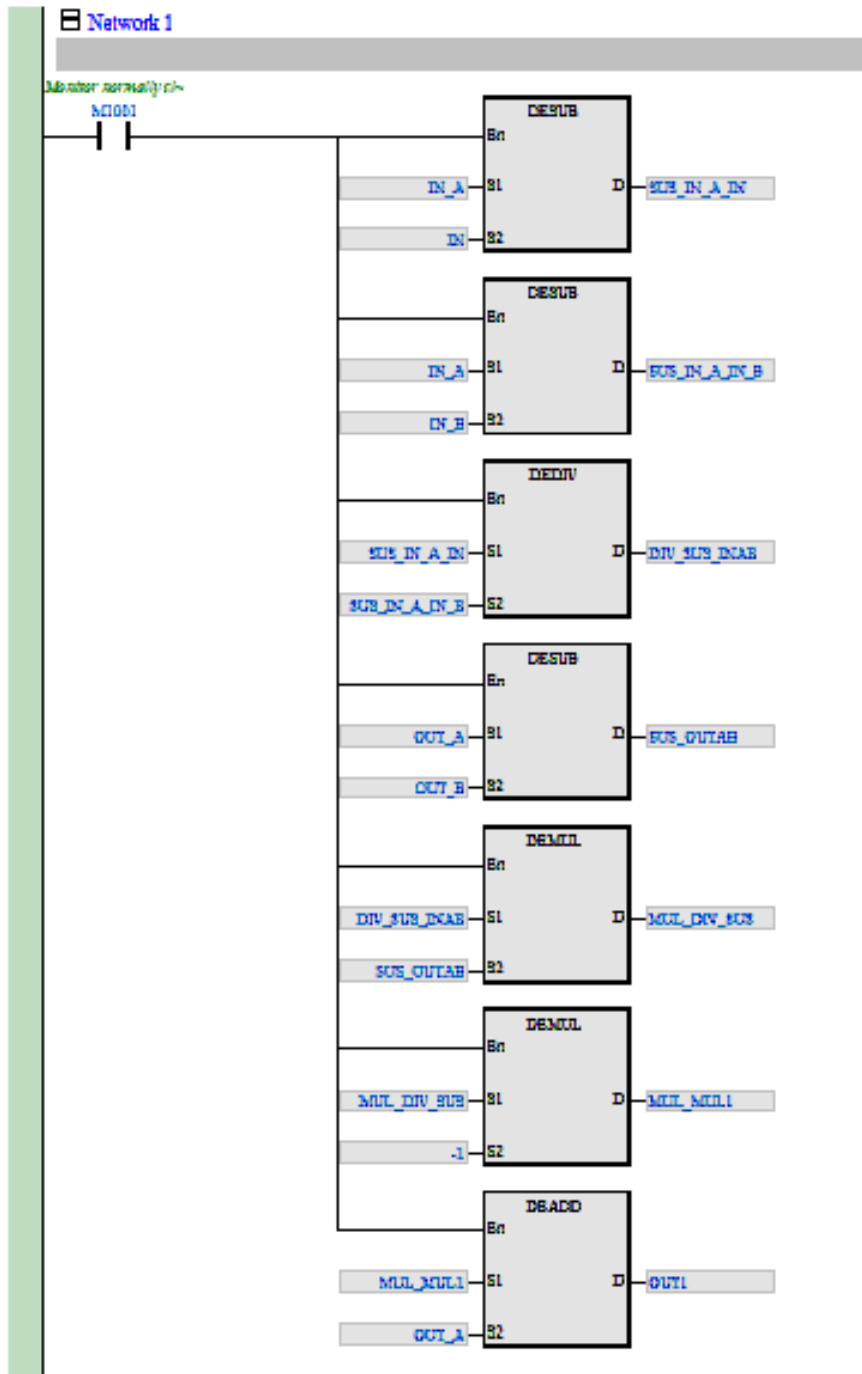
5.3.2. ANEXO B (DIAGRAMA DE CONEXIONES DEL PLC)



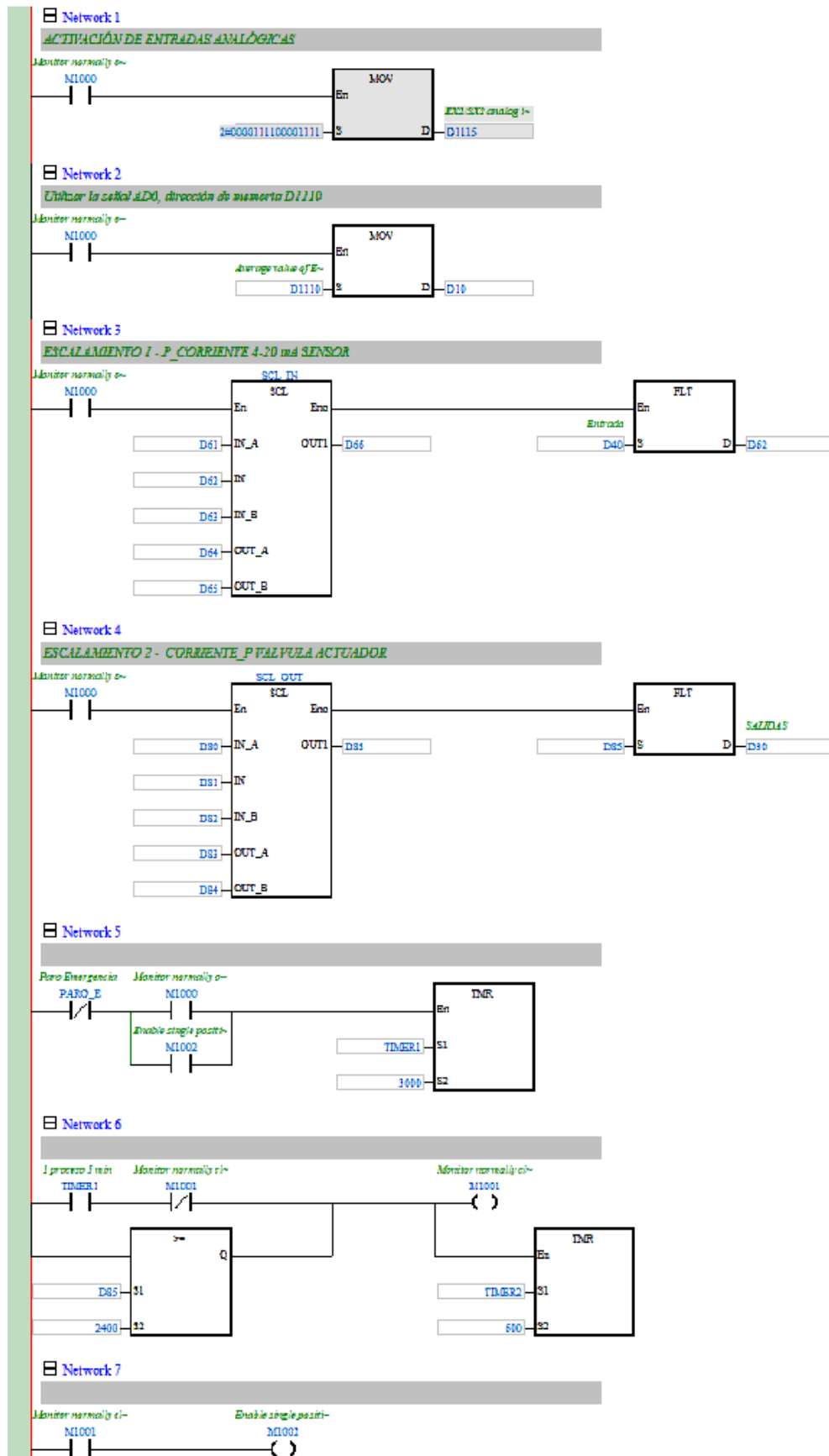
Anexo 8.B. Diagrama de conexiones del PLC DELTA DVP 20SX2.



Anexo 9.B. Diagrama de conexiones de los componentes del sistema de la Autoclave.



Anexo 10. Escalado de valores proporcionales a 4-20 mA.



Anexo 11. Programación Ladder para el sistema de automatización.