



# **Diseño y fabricación de línea de extrusión para materiales termoplásticos reforzados con fibras naturales**

**Joe Alejandro Moreno González  
Johan Sebastián Cabiativa Peñuela**

**Universidad ECCI  
Facultad De Ingeniería  
Programa De Ingeniería Mecánica  
Bogotá D.C.  
Año 2018**

# **Diseño y fabricación de línea de extrusión para materiales termoplásticos reforzados con fibras naturales**

**Joe Alejandro Moreno González**  
**Johan Sebastián Cabiativa Peñuela**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título  
de:

**Ingeniero Mecánico**

Director:

**DANIEL EDUARDO VILLALOBOS CORREA**

Ingeniero Mecánico

Magíster en Ingeniería - Materiales y Procesos

Codirector:

**SERGIO ENRIQUE PLAZAS JIMÉNEZ**

Ingeniero Químico

Línea de Investigación:

Diseño Mecánico

Grupo de Investigación:

Grupo de Investigación en Diseño Mecánico y Materiales GIDMyM

Universidad ECCI

Facultad De Ingeniería

Programa De Ingeniería Mecánica

Bogotá D.C.

Año 2018

# Agradecimientos

Deseamos expresar nuestro profundo agradecimiento a Dios y a la vida por ponernos en el camino esta grata experiencia de estudiar ingeniería mecánica, a nuestra familia por su colaboración y acompañamiento durante todo este arduo camino y en especial a los docentes Ing. Sandra Romero, Ing. Daniel Villalobos y al Ing. Sergio Plazas quienes su vocación y su deseo de crear innovación los llevó a confiar en nosotros y en nuestras capacidades brindándonos todo su apoyo, esfuerzo y dedicación para que este proyecto de grado fuera culminado con éxito.

## Resumen

En este trabajo se realizó el diseño y fabricación de una línea de extrusión de polímeros que permita obtener láminas de plástico reforzadas con fibras naturales. Para hacer esto posible se estableció la fabricación y diseño de un dado de extrusión y un sistema de laminación mediante rodillos como complementos para una línea de extrusión perteneciente a la universidad ECCI.

El diseño se realizó utilizando una metodología híbrida tomando conceptos de distintas metodologías; se establecieron las necesidades que se deban suplir por solicitud del cliente, se realizaron algunas pruebas de laboratorio para conocer ciertas características propias del material a obtener, así como algunas pruebas técnicas realizadas con la extrusora para tomar datos básicos para el inicio de diseño. Posterior a estas pruebas se realizan algunos bocetos de los posibles modelos que se podrían fabricar evaluando su eficiencia, costo de fabricación, y adaptación a la línea de extrusión para terminar escogiendo el mejor modelo y realizando todo el proceso matemático para garantizar que las piezas a fabricar cumplan con todas las necesidades mecánicas que exige el sistema.

Finalmente se realiza la fabricación de un dado de extrusión en forma de cola de pescado con un sistema de nivelación interno para poder regular el caudal de salida y un sistema de calentamiento a través de resistencias tipo cartucho; y un sistema de laminación por rodillos para realizar la impregnación del polímero con la fibra natural. El sistema de laminación cuenta con motores individuales regulables para controlar la velocidad de giro de los rodillos y niveladores de distancia para el espesor del material compuesto.

**Palabras clave:** Extrusión, material compuesto, laminación, dado de extrusión, resistencias.

## Abstract

In this work the design and manufacture of an extrusion line of polymers that allows to obtain plastic sheets reinforced with natural fibers was made. Through the manufacture and design of an extrusion die and roller rolling system as complements for an extrusion line belonging to the ECCI university.

The design was made using a hybrid methodology taking concepts from different methodologies; the needs that must be supplied by the client's request were established, some laboratory tests were performed to know certain characteristics of the material to be obtained, as well as some technical tests carried out with the extruder to take basic data for the start of design. After these tests are made some sketches of the possible models that could be manufactured by evaluating their efficiency, manufacturing cost, and adaptation to the extrusion line to finish choosing the best model and performing the entire mathematical process to ensure that the parts to be manufactured meet all the mechanical needs demanded by the system.

Finally, the manufacture of an extrusion die in the form of a fish tail is carried out with an internal leveling system to regulate the output flow rate and a heating system through cartridge-type resistances; and a roller rolling system for impregnating the polymer with the natural fiber. The rolling system has individual adjustable motors to control the speed of rotation of the rollers and distance levelers for the thickness of the composite material.

**Keywords:** Extrusion, composite material, lamination, extrusion die, resistors

# Contenido

Resumen	4
Lista de figuras	8
Lista de tablas	9
Lista de ecuaciones	10
Introducción	11
1. Capítulo 1	14
1.1 Estado del arte	14
1.2 Marco teórico	20
1.2.1 Compuestos.	20
1.2.2 Fibras	29
1.2.3 Procesos de conformado.	31
1.2.3.1 Extrusión:	33
1.2.3.2 Dado de extrusión:	35
1.2.3.3 Calandrado:	38
1.2.3.4 Laminado:	40
1.2.4 Teoría de falla - Von Mises.	41
1.2.5 Método de elementos finitos.	43
2 Capítulo 2	45
2.2 Metodología de diseño.	45
3 Diseño básico	51
3.2 Parámetros iniciales	52
3.3 Laboratorios.	55
3.3.2 Prueba de caudal.	55
3.3.3 Pruebas de tensión	57
3.3.4 Prueba de compresión	61
3.3.5 Prueba de presión en rodillos	63
3.4 Selección de material.	65
3.5 Bocetos.	67
3.5.2 Opciones de dado.	69

---

3.5.3	Opciones de sistema de laminación.	71
3.5.3.1	Solución N°1	71
3.5.3.2	Solución N°2	71
3.6	Diseño térmico de dado.	73
3.7	Cálculos de laminación.	76
3.7.2	Cálculo de las fuerzas de compresión y potencia de laminación.	76
4	Capítulo 4	80
4.2	Diseño detallado.	80
4.2.2	Diseño eje de laminación.	80
4.3	Elementos finitos.	87
4.3.2	Diseño por elementos finitos.	87
4.3.2.1	Barra de soportes laterales	90
4.3.2.2	Base de soporte superior	94
4.3.2.3	Porta rodamiento superior de rodillo	98
4.3.2.4	Porta rodamiento inferior de rodillo.	102
4.3.2.5	Placa de sujeción	106
4.3.2.6	Dado de extrusión	108
	Parte inferior	109
	Parte superior	110
5	Conclusiones y recomendaciones.	112
5.2	Conclusiones	112
5.3	Recomendaciones	114
A.	Anexo: Planos.	116
	Bibliografía	117

## Lista de figuras

<b>Figura 1-1</b> Aplicaciones de materiales compuestos en distintos sectores de la industria en Europa en 2012 [5]	15
<b>Figura 1-2</b> Bloque de adobe [11]	20
<b>Figura 1-3</b> Sub clasificación según su forma [11]	22
<b>Figura 1-4</b> Biocompuestos [5]	27
<b>Figura 1-5</b> Sectores de aplicación de los composites [11]	28
<b>Figura 1-6</b> Diseño esquemático de línea de extrusión [15]	33
<b>Figura 1-7</b> Componentes principales de un extrusor [17]	35
<b>Figura 1-8</b> Corte de visto lateral dado de extrusión [17]	35
<b>Figura 1-9</b> a) dado en forma de T. b) dado en forma de cola de pescado [17]	37
<b>Figura 1-10</b> Geometría de dado en forma de gancho de ropa [18]	38
<b>Figura 1-11</b> Sistema de calandrado [20]	39
<b>Figura 1-12</b> sistema de laminación [22]	40
<b>Figura 1-13</b> Estructura del proceso de diseño [23]	43
<b>Figura 2-1</b> Peletizadora, camisa de extrusión, U. ECCI.	47
<b>Figura 2-2</b> Peletizadora, tolva de refrigeración, U. ECCI.	48
<b>Figura 2-3</b> Maquina universal de ensayo TINIUS OLSEN H10KS.	50
<b>Figura 3-1</b> Tornillo de extrusión [26]	53
<b>Figura 3-2</b> Impregnación de yute con polietileno de baja densidad.	55
<b>Figura 3-3</b> Probetas para pruebas de tensión densidad.	58
<b>Figura 3-4</b> Probeta instalada en máquina universal de ensayos.	59
<b>Figura 3-5</b> Grafica de fuerza vs extensión a tensión.	60
<b>Figura 3-6</b> Prueba de compresión de material compuesto.	61
<b>Figura 3-7</b> Gráfica esfuerzo vs deformación a compresión.	62
<b>Figura 3-8</b> Mecanismo de medición.	63
<b>Figura 3-9</b> toma de presión ejercida por los rodillos sobre el material.	64
<b>Figura 3-10</b> Material compuesto obtenido durante el laboratorio material.	65



## Lista de tablas

<b>Tabla 1-1</b> Autopartes reforzadas con fibras naturales [5]	16
<b>Tabla 1-2</b> Tipos de termoplásticos [12].	23
<b>Tabla 1-3</b> Algunos termoestables [12]	24
<b>Tabla 1-4</b> Algunos elastómeros [12].	25
<b>Tabla 1-5</b> Tabla materiales compuestos [11].	26
<b>Tabla 1-6</b> Fibras naturales [14].	29
<b>Tabla 1-7</b> Fibras sintéticas [14].	30
<b>Tabla 1-8</b> Métodos de conformado para materiales plásticos [14].	32
<b>Tabla 1-9</b> Productos más comunes obtenidos mediante extrusión [17]	36
<b>Tabla 2-1</b> Modelo de metodología.	45
<b>Tabla 2-2</b> Datos técnicos Peletizadora.	47
<b>Tabla 2-3</b> Datos técnicos máquina universal de ensayo TINIUS OLSEN H10KS.	49
<b>Tabla 3-1</b> Datos técnicos tornillo de peletizadora.	53
<b>Tabla 3-2</b> Características de las probetas.	57
<b>Tabla 3-3</b> Características de los materiales[24].	66

## Lista de ecuaciones

<b>Ecuación 1</b> Energía de deformación.	41
<b>Ecuación 2</b> Esfuerzo hidrostático	41
<b>Ecuación 3</b> Energía de distorsión.	41
<b>Ecuación 4</b> Energía de distorsión	42
<b>Ecuación 5</b> Esfuerzo de Von Mises	42
<b>Ecuación 6</b> Condición de falla	42
<b>Ecuación 7</b> Caudal máximo	54
<b>Ecuación 8</b> Presión máxima	54
<b>Ecuación 9</b> Valor de velocidad de extrusión experimental.	56
<b>Ecuación 10</b> Caudal	56
<b>Ecuación 11</b> Área de salida de material dado pellet.	56
<b>Ecuación 12</b> Áreas obtenidas del dado de pellet.	56
<b>Ecuación 13</b> Caudal obtenido del dado de pellet.	56
<b>Ecuación 14</b> Área obtenida para dado plano	56
<b>Ecuación 15</b> velocidad a partir de fórmula elemental caudal.	57
<b>Ecuación 16</b> Velocidad angular	57
<b>Ecuación 17</b> Básica de presión.	64
<b>Ecuación 18</b> Despeje de fuerza.	65

## Introducción

El proceso de extrusión se define como la producción de piezas en línea de materiales termoplásticos mediante la conducción forzada del material fundido a través de un molde o dado que presenta ciertas características mecánicas con las cuales se obtiene el diseño final de la pieza. Dentro de los sistemas de producción que se encuentran en la industria para la producción de piezas en material polimérico la extrusión es uno de los más usados por su facilidad de producir piezas de geometría sencilla, así como su alto rendimiento a la hora de producir en masa.

La industria del plástico es tan inmensa y tan versátil que en la actualidad es muy difícil encontrar un campo industrial donde no se use piezas de materiales poliméricos, sin embargo, detrás de todas las ventajas que ofrecen estos materiales encontramos un problema de gran magnitud el cual afecta notablemente a nuestro medio ambiente y es el proceso de descomposición final de estos materiales ya que al no ser rápidamente biodegradables la contaminación que generan estos residuos es bastante significativa.

Gracias a esto la necesidad de realizar materiales compuestos más amigables con el medio ambiente es uno de los campos de estudio y desarrollo que más atraen en la actualidad a la industria en general, adicional a esto con todas las normativas que están generando los gobiernos de cada nación en pro del medio ambiente es esencial desarrollar nuevos materiales que cumplan con los estándares ambientales, de aquí surge el uso de fibras y compuestos naturales como el fique, yute, entre otros; como material de refuerzo o complemento de las matrices poliméricas, creando así nuevas alternativas de materia prima con características mecánicas distintas y con una disposición final más aceptable.

Este proyecto pretende cumplir con el primer objetivo específico del proyecto “desarrollo de materiales compuestos de matriz termoplástica reforzados con fibra de fique” presentado mediante convocatoria interna y aprobado por el departamento de

investigación de la universidad ECCI. El proyecto se encuentra financiado por la Institución mediante un presupuesto aprobado previamente y con el cual cuentan los docentes para cumplir todos sus objetivos, parte de este presupuesto ha sido designado para este trabajo de grado y este presupuesto se tendrá en cuenta al momento de evaluar costos del diseño.

El objetivo principal es diseñar y fabricar una línea de extrusión para obtener un material compuesto de matriz termoplástica reforzada con fibras naturales.

Como objetivos específicos se establecieron los siguientes:

- Analizar el estado actual de la extrusora del laboratorio de plásticos de la universidad ECCI para la adecuación al proyecto propio.
- Diseñar el dado de extrusión para obtener las láminas del polímero.
- Diseñar la calandra para realizar el proceso de unión entre el polímero y el núcleo fibra natural.
- Fabricar el dado y la calandra de la línea de extrusión para la obtención de materiales compuestos.
- Ensamblar y operar la línea de extrusión fabricada.

En el primer capítulo se realizará un recorrido histórico por todo el proceso de producción y fabricación de polímeros como sus primeras aplicaciones en la industria. Se realizará un estudio de los conceptos básicos de extrusión, así como todos sus accesorios y los sistemas de laminado y calandrado para la obtención de polímeros en forma de lámina. También se realizará un estudio sobre los materiales compuestos teniendo en cuenta su obtención, sus múltiples usos y en especial la obtención de materiales compuestos reforzados con fibras naturales.

Se establecerá la formulación matemática para el proceso de diseño teniendo en cuenta dos conceptos básicos principales, el primero las propiedades generales de los polímeros, así como las condiciones básicas que se deben cumplir para producir polímeros y la segunda las propiedades mecánicas de la máquina que se deben cumplir para poder fabricar una máquina eficiente y económica.

El segundo capítulo comprende la elección de la metodología de diseño aplicada, así como las pruebas iniciales realizadas a los materiales trabajados, el tercer capítulo ya se presentará un diseño básico del dado de extrusión y del sistema de laminación por rodillos con sus primeros planos. En el cuarto capítulo se mostrará todo el proceso de diseño detallado, así como los cálculos de diseño y diseño final, en el quinto capítulo se exhibirá todo el proceso de ensamble del sistema fabricado y la puesta en marcha, se evaluarán los comportamientos del sistema y los detalles que se tendrán en cuenta para el correcto funcionamiento del montaje; adicional a esto se generará todo un protocolo de mantenimiento del sistema. Ya en el sexto capítulo se presentará todas las conclusiones del proyecto, las recomendaciones del equipo y se enseñará el documento final.

# 1. Capítulo 1

## 1.1 Estado del arte

El desarrollo de los materiales compuestos se ha convertido en un campo de investigación de gran interés para todos los sectores, donde la necesidad de reducir costos y cumplir con las normas ambientales locales ha llevado a la búsqueda de reemplazar materiales sintéticos por nuevos materiales que cumplan con las necesidades de cada industria. La utilización de fibras naturales como el yute, fique, ramina, cáñamo entre otros; obtenidas directamente de plantas cultivadas de manera natural, da una nueva posibilidad de reducir el impacto ambiental que se tiene de un material sintético que puede durar más de 200 años en realizar el proceso de descomposición. Los compuestos brindan una mejor resistencia a la deformación, tienen generalmente una baja densidad sin contar que permite un mejor manejo de los desechos al poder ser reciclado, sin embargo, aún el diseño de piezas es muy limitado y el costo de fabricación para grandes piezas es considerable.

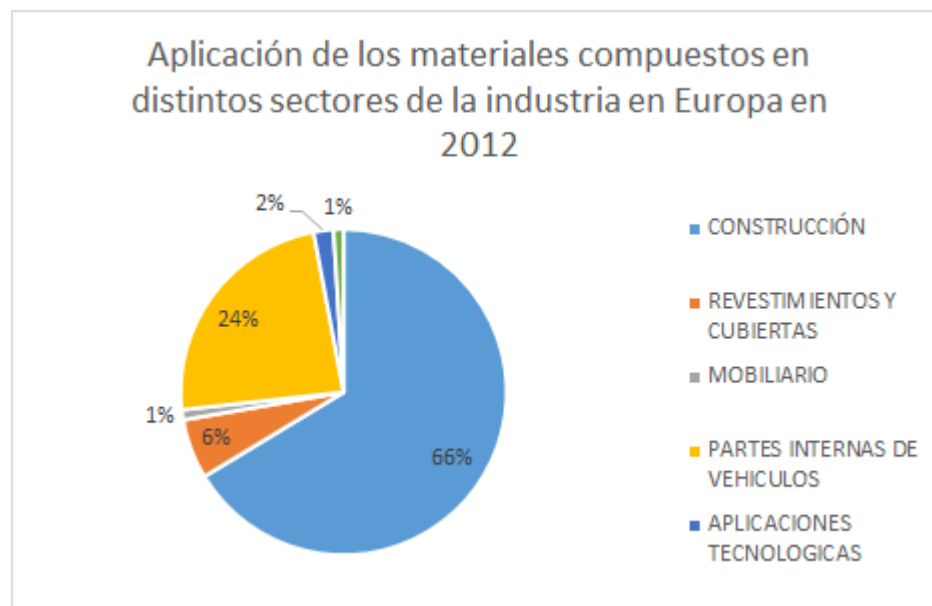
Los compuestos aparecen hace más de 100 años, En 1896 los asientos y los tanques de combustibles eran fabricados con fibras naturales mezclados con aglutinante polimérico. Por la misma época el primer material compuesto fue aplicado en la fabricación de tubos y láminas de gran extensión usados en la industria eléctrica y electrónica. [1]. Tiempo después el plástico tuvo su aparición en los años 40 pero tuvo su crecimiento industrial en los años 1970's enfocándose principalmente en la línea de empaques, cierres, entre otros [2]. Durante la crisis energética de 1970 el sector automotriz tuvo un gran interés por el desarrollo de materiales compuestos para reducir el peso de los vehículos y mejorar su eficiencia, sin embargo, los materiales compuestos para la época y aun en la actualidad tienen un costo mayor de producción que los materiales usados generalmente lo cual no ha permitido que tengan un desarrollo bastante modesto. [3]

Materiales sintéticos utilizados para la fabricación de empaques como el alcohol de polivinilo (PVOH) y la policaprolactona (PCL) han sido comparados con el desarrollo de un material compuesto con matriz de origen natural llamado TPS o más conocido como

almidón termoplástico. Este compuesto ha sido estudiado de manera separada como un polímero biodegradable y de manera conjunta al ser parte de un compuesto mayor cuando es mezclado con poliestireno, polietileno o polipropileno entre otros. [4]

Un estudio realizado en el instituto de ecología e innovación NOVA de Alemania sobre la tendencia en un futuro de los materiales compuestos en Europa los sectores donde se evidencia el mayor volumen el uso de materiales compuestos son en el sector automotriz y en el sector de la construcción; entre el 10% y el 15 % de los materiales compuestos obtenidos usan como compuestos naturales la madera o el papel y las fibras naturales como el fique, el yute entre otros. [5]

**Figura 1-1** Aplicaciones de materiales compuestos en distintos sectores de la industria en Europa en 2012 [5]



Nombre de la fuente: Nova – institut GmbH Versión 2015-05

Cabe resaltar que para el 2012 fueron usadas únicamente en el sector automotriz 92.000 toneladas de NFC (siglas en inglés para, compuestos con fibras naturales). La aplicación de los materiales compuestos está direccionada a la producción de las piezas internas de los vehículos como lo son los paneles de las puertas, los tableros frontales, la cojinería y los demás detalles internos que cumplen con dar un toque de elegancia al vehículo y al mismo deben ser resistentes a diferentes tipos de esfuerzos. [5]

La empresa Johnson Controls, uno de los fabricantes más grandes de piezas y accesorios automotrices en el mundo ha desarrollado toda una línea de fabricación de piezas usando materiales compuestos con fibras naturales. Madera, yute, sisal, entre otros son los compuestos de origen natural con los que han venido trabajando y los resultados han sido bien aceptados por la industria automotriz (Tabla 1-1), permitiendo así que los fabricantes de vehículos puedan cumplir con las normas europeas que establece que un vehículo en su disposición final debe permitir reciclar su material en un 85% de su peso total. [6]

**Tabla 1-1** Autopartes reforzadas con fibras naturales [5]

Modelo	Fabricante	Partes
A2,A3,A4,A4 Avant,A6,A8,Roadstar, Coupe	Audi	Respaldos de asientos, paredes de puertas, revestimiento de cajuela, estante de sombrero, revestimiento de rueda de refacción.
C5	Citroen	Paneles interiores de puertas
3,5,7 series	BMW	Paneles de puertas, apoyacabezas, recubrimiento de techo, revestimiento de cajuela, respaldos de asientos, panel de aislamiento de ruido, revestimiento moldeado de posa pies.
Eco Elise	Lotus	Paneles de carrocería, spoilers, asientos, alfombras interiores.
Punto bravo, Marea, Alfa Romeo 146, 156	Fiat	Panel de puertas.
Astra, Vectra, Zafira	Opel	Panel de instrumentos, recubrimiento de techo, paneles de puertas, panel de cubierta de pilar.
406	Peugeot	Paneles de las puertas frontales y traseras



**Tabla 1-1** (Continuación).

Modelo	Fabricante	Partes
2000 y otros	Rover	Aislamiento, anaquel trasero para almacenar.
Raum, Brevis, Harrier, Celsior	Toyota	Paneles de puertas, respaldos de asientos, alfombra, cubierta de llanta de refacción.
Golf A4, Passat Variant, Bora	Volkswagen	Panel puertas, respaldo de asientos, acabado de panel de cajuela, revestimiento de cajuela.
Space, Star, Colt	Mitsubishi	Piso de área de carga, paneles de puertas, panel de instrumentos.
Clio, Twingo	Renault	Anaqueles traseros
Mercedes A, C, E S class, Trucks, Evobus	Daimler-Benz	Paneles de puertas, tablero de instrumentos, tableta, panel de cubierta de pilar, guantera, soporte de panel de instrumentos, aislamiento, paneles de respaldo de asientos, panel de cajuela, superficie de asiento y respaldo, cubierta interna de motor, aislamiento de motor, visera, defensas, caja de llanta, cubierta de techo.
Pilot	Honda	Área de carga
C70, V70	Volvo	Acolchado de asiento, espumas naturales, bandeja de piso de carga.
Cadillac, Deville, Chevrolet TrailBlazer	General Motors	Respaldos de asientos, pisos de área de carga.
L3000	Saturn	Charola de zona de carga y panel de puerta

**Tabla 1-1** (Continuación).

Modelo	Fabricante	Partes
Mondeo CD 162, Focus, Freestar	Ford	Charola de piso, paneles de puertas, cubierta para Bpillar, forro de cajuela, tablero de instrumentos defensa, cubierta de motor.

Nombre de la fuente: M. B. Michael Carus, Dr. Asta Eder, Lara Dammer, Dr. Hans Korte, Lena Scholz, Roland Essel, Elke Breitmayer and First, "Wood-Plastic Composites (WPC) and Natural Fibre Composites (NFC): European and Global Markets 2012 and Future Trends in Automotive and Construction," Nov. Inst., vol. 12, no. 2, 2014.

El sector aeronáutico también ha demostrado su interés en varios proyectos que se han realizado para desarrollar mejores materiales compuestos; uno de los más tentativos por sus buenos resultados fue un material compuesto reforzado con fibras de bambú, los resultados al realizar pruebas de esfuerzos mecánicos fueron muy destacados, tanto así que obtuvo mejores características que otros materiales comunes como por ejemplo el aluminio. [7]

En nuestro país se destacan estudios con compuestos naturales tales como la fibra de guadua en el trabajo de Moreno y Trujillo (2007), quienes analizan las características de fibra de guadua angustifolia para evaluar la factibilidad de usarlos como posible refuerzo en compuestos o Cuéllar y Muñoz (2010), quienes fabrican compuestos de poliéster con refuerzos de guadua y Mejía (2010), quien procesa y caracteriza fibras de bambú para ser usadas con el mismo fin [8].

Desde el desarrollo de los materiales termoplásticos el proceso de extrusión ha sido uno de los métodos de producción más utilizados para la obtención de piezas, herramientas y distintas presentaciones de todos los polímeros que permiten ser trabajados bajo este proceso. Las líneas de extrusión a través del tiempo han dejado de ser un diseño estándar de un solo ensamble a un sistema de producción que permite ser adecuado a las necesidades del producto a fabricar. [9]

Dado al crecimiento significativo en cuanto a la demanda de polímeros a nivel mundial la necesidad de expandir y abarcar todas las industrias permitió que la producción de polímeros fuera cada vez más segmentada y los desarrollos para la producción del producto no se quedaron atrás. La extrusión es uno de los procesos de producción más antiguos del modelado de plástico; sin embargo, este proceso no ha sufrido cambios trascendentales en su diseño. La producción de polímeros tuvo un gran crecimiento industrial poco después de finalizada la segunda guerra mundial; en 1945 la producción de plástico no supera el millón de toneladas anual, sin embargo, para 1981 la producción de polímeros era tan alta que sobrepasaba la producción de hierro y metales forjados y para el año 2000 la producción sobrepasaba los 200 millones de toneladas anuales. [10]

Inicialmente el proceso se desarrollaba con un tornillo extrusor uniforme y un barril a temperatura constante, luego, a través del tiempo se realizaron las modificaciones de diseño al tornillo extrusor variando su altura de paso durante su extensión, así mismo se establecieron zonas de calor a distintas temperaturas en el barril para poder obtener una mayor homogeneidad basados en la relación L/D (longitud/diámetro). [9]

El dado de extrusión cumple la función más importante en cuanto a acabado, diseño y producción de productos poliméricos. La variedad de formas que presentan los dados de extrusión permite realizar grandes producciones en serie de elementos con una geometría sencilla. Entre los defectos más comunes que se logran evidenciar durante la extrusión de plástico tenemos:

- Burbujas de aire en el producto final.
- Superficies rugosas ya sea externa o internamente (en el caso de fabricación de tubería)
- Porosidad o marcas por defectos de fábrica del dado.

## 1.2 Marco teórico

### 1.2.1 Compuestos.

Los compuestos nacen de la unión entre un material base y uno o varios materiales de refuerzo o complemento con el propósito de obtener mejores características mecánicas de las que tiene cada material por separado.

Uno de los primeros compuestos de los cuales se tienen conocimiento y que aun actualmente los podemos encontrar en algunas partes de nuestra geografía colombiana es el “adobe”, una mezcla de dos compuestos, el barro como matriz principal y la paja como compuesto adicional que permite mejorar las propiedades, como lo podemos ver en la Figura 1-2 con este compuesto se formaban bloques los cuales se usaban para levantar las paredes de las viviendas antiguas.

**Figura 1-2** Bloque de adobe [11]



Nombre de la fuente: Dr. Everardo Hernández, “El adobe, ventajas y características térmicas,”

*Rev. Escala*, no. 0120-6702, 2010.

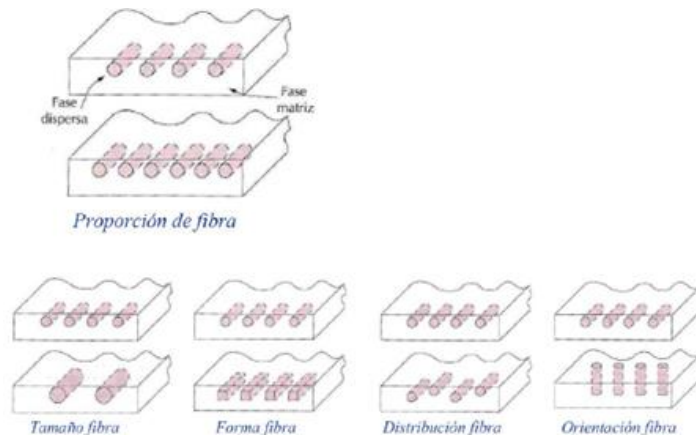
El sector industrial se ha encargado de clasificar los compuestos de distintas maneras basados en características puntuales. Por ejemplo, según la forma del material de refuerzo se agrupan en tres grupos:

- Granulado: Las partículas que brindaran un refuerzo son de tamaños bastante pequeños y su forma es similar a la de una esfera amorfa.
- Fibroso: El material se encuentra en tiras de distintas longitudes o trenzado para formar mallas. El objetivo es obtener un compuesto con una elevada resistencia y rigidez, a bajas y altas temperaturas y a su vez una baja densidad, en el momento de diseñar un compuesto reforzado por fibras debemos tener en cuenta la longitud, diámetro, orientación, propiedades de las fibras, propiedades de la matriz y la unión entre estas. Las fibras se clasifican en cortas, largas y continuas, en las cuales se tiene en cuenta la relación  $L/d$ , la cual determina la resistencia que una fibra va a comunicar a la matriz. Es importante aclarar que entre mayor sea el contenido de fibra así mismo será el incremento de la resistencia del compuesto.

Por lo general se necesita que las fibras sean resistentes, indeformables, ligeras y que su punto de fusión sea elevado, así mismo en la matriz se debe tener en cuenta su ductilidad, elasticidad, resistencia a la erosión, resistencia térmica, ya que la matriz protegerá las fibras, como también transmitirá a las fibras las cargas que soporte el material, con lo cual se busca disminuir la propagación de rupturas de fibras de una a otra. La unión entre la fibra y la matriz debe ser máxima, ya que esto determinará el deterioro del compuesto, la trasmisión de carga desde la matriz a la fibra, en los casos donde los materiales no presenten un buen enlace es pertinente utilizar aditivos en el proceso para generar la máxima unión.

La Figura 1-3 permite observar la importancia de la geometría, el tamaño y la separación entre fibras del material que va a servir de refuerzo para la matriz; según como se presente la mezcla entre ambos compuestos se pueden obtener mejores características físicas y mecánicas del compuesto.

**Figura 1-3** Sub clasificación según su forma [11]



Nombre de la fuente: A. Moral Borque and M. Noguera Lopez, "Materiales de última generación y materiales eficientes: Materiales compuestos - composites." pp. 1–17, 2007.

- Laminar: El compuesto se genera bajo la unión de placas de distinto espesor y en un orden establecido por el fabricante. [11]

Otra clasificación bastante conocida es según el tipo de matriz que lleva el compuesto, de acuerdo con esto podemos encontrar los siguientes compuestos:

- Termoplásticos: Los plásticos termoplásticos se caracterizan por:
  - Se deforman con el calor
  - Solidifican al enfriarse
  - Permiten ser procesados varias veces sin disminuir sus propiedades, por lo cual son reciclables
  - Por lo general su temperatura de deformación no supera los 150°C

Como se muestra (Tabla1-2) los termoplásticos se pueden clasificar de la siguiente manera:

**Tabla 1-2** Tipos de termoplásticos [12].

Nombre		Propiedades	Aplicaciones
Poliestireno (PS)	Duro	Transparente, pigmentable	Filmes transparentes para embalajes y envoltorios de productos alimenticios
	Expandido	Esponjoso y blando	Embalaje, envasado, aislamiento térmico y acústico
Polietileno (PE)	Alta densidad	Rígido y resistente transparente	Utensilios domésticos y juguetes
	Baja densidad	Blando, ligero y transparente	Bolsas, sacos, vasos y platos
Nylon (PA o poliamidas)		Translúcido, brillante, resistente, flexible e impermeable	Tejidos, cepillos de dientes, cuerdas de raquetas
PVC (Cloruro de polivinilo)		Presenta un amplio rango de durezas impermeable	Tuberías, suelas de zapatos, guantes, trajes impermeables
Metacrilato (Plexiglás)		transparente	Faros y pitos de coches, ventanas, carteles luminosos, relojes

**Tabla 1-2** (Continuación).

Nombre	Propiedades	Aplicaciones
Teflón (Fluorocarbono)	Deslizante antiadherente	Utensilios de cocina, como las sartenes y superficies de encimeras

Nombre de la fuente: T. Richardson and E. Lokensgard, *INDUSTRIA DEL PLÁSTICO*. 1999.

- **Termoestables:** Los plásticos termoestables se procesan mediante curado en el cual se le da su dimensión final aplicando presión y calor. Durante este proceso, las cadenas de polímeros se entrecruzan, generando un plástico rígido y más resistente a altas temperaturas, aunque así mismo más frágil, este plástico no puede ser reciclado mediante calor. Podemos mencionar los siguientes materiales termoestables (Tabla 1-3).

**Tabla 1-3** Algunos termoestables [12]

Nombre	Propiedades	Aplicaciones
Poliuretano (PUR)	Esponjoso, flexible, blando, macizo, elástico y adherente	Espuma para colchones y asientos, esponjas, aislamientos térmicos y acústicos, juntas correas para transmisión de movimientos, rueda de fricción, pegamentos y barnices.
Resinas fenólicas (PH)	Con fibras, resistentes al choque con amianto, resistente térmico, color negro o muy oscuro, aislantes eléctricos.	Mangos y asas de utensilios de cocina, ruedas dentadas carcazas de electrodomésticos, aspiradores, aparatos de teléfono, enchufes, interruptores, ceniceros



**Tabla 1-3** (Continuación).

Nombre	Propiedades	Aplicaciones
Melamina	Ligero, resistente y de considerable dureza, no tiene olor ni sabor, aislante térmico.	Accesorios electrónicos, aislamiento térmico y acústico, superficies de encimeras de cocina, varillas, recipientes para alimentos.

Nombre de la fuente: T. Richardson and E. Lokensgard, *INDUSTRIA DEL PLÁSTICO*. 1999.

- **Elastómeros:** Las macromoléculas de los plásticos elastómeros forman una red que permite que se contraiga y se estire cuando estos materiales son sometidos a tensión y compresión, por lo cual son elásticos. Este material no tiene buena resistencia al calor y se degrada a exposición media. Podemos mencionar los siguientes materiales elastómeros (tabla1-4) [12].

**Tabla 1-4** Algunos elastómeros [12].

Tipos	Obtención	Propiedades	Aplicación
Caucho natural	Látex	resistente, inerte	Aislamiento térmico y eléctrico
Caucho sintético	Derivados del petróleo	Resistencia a agentes químicos	Neumáticos, volantes, parachoques, pavimentos, tuberías, mangueras, esponjas de baño y colchones.
Neopreno	Caucho sintético	Mejora las propiedades del caucho sintético: Es más duro y resistente. Impermeable	trajes de inmersión

Nombre de la fuente: T. Richardson and E. Lokensgard, *INDUSTRIA DEL PLÁSTICO*. 1999.

Los materiales compuestos no se pueden establecer como una invención humana ya que la misma naturaleza es capaz de generar materiales que contienen dos o más componentes, un ejemplo común es la madera [11] la cual se encuentra compuesta por una armadura de fibras celulósicas envueltas en una matriz de resinas naturales, por otro lado el cuerpo humano posee materiales compuestos, como lo son los huesos, conformados por cemento cálcico y fibras de colágeno, como se muestra (Tabla 1-5), se mencionan algunos compuestos más relevantes. [11]

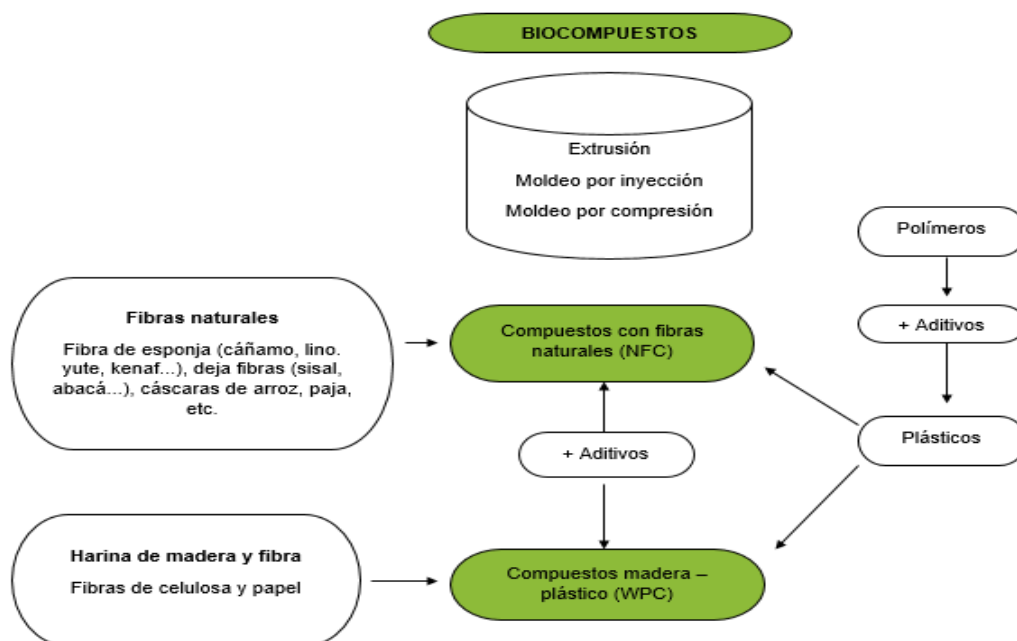
**Tabla 1-5** Tabla materiales compuestos [11].

	Material		Matriz	Fibra / refuerzos
En la naturaleza	Madera		Resinas naturales	Fibra de celulosa
En el cuerpo humano	Huesos		Cemento cálcico	Fibra de colágeno
Invención humana para la construcción	Antigüedad	Adobe	Barro	Paja
		Yeso armado	Yeso	Crines de caballo
	Modernas	Hormigón armado	Hormigón	Armadura de acero
		Amianto cemento	Mortero de cemento	Amianto
		Morteros y hormigones fibrosos	Mortero	Acero, vidrio, polimérica, carbono, vegetales.
			Hormigón	
		Yeso armado	Yeso	Vidrio, poliméricas, vegetales

**Tabla 1-5** (Continuación).

	Material	Matriz	Fibra / refuerzos
	Compuesto	Resina	Vidrio, poliméricas, carbono, aramida.
	Morteros poliméricos	Resina	Áridos

Nombre de la fuente: M. Olivares Santiago, C. Galán Marín, and J. Roa Fernández, “Los composites: características y aplicaciones en la edificación (composites: characteristics and applications in building construction),” Sevilla, 2003.

**Figura 1-4** Biocompuestos [5]

Nombre de la fuente: Nova – institute GmbH Versión 2015-05

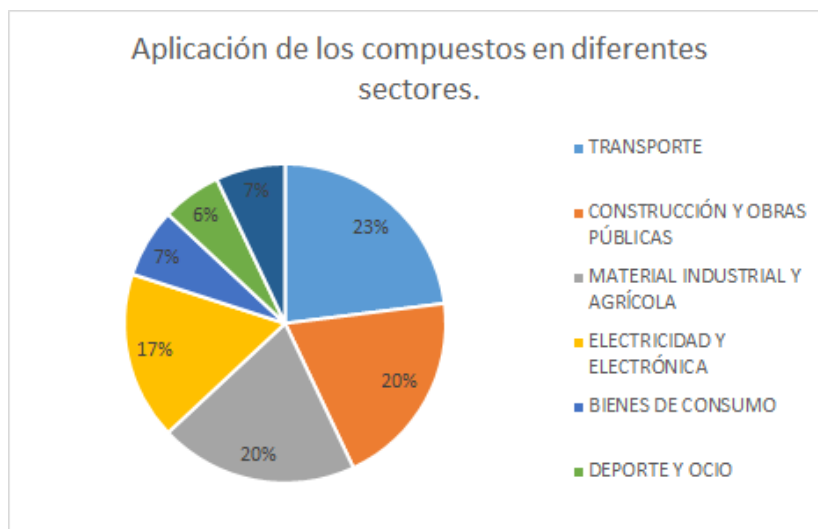
Los compuestos sintéticos al igual que toda la amplia gama de plásticos después de los años setenta acapararon el mercado mundial en la fabricación de piezas y elementos

para la mayoría de los sectores industriales. La baja densidad, maquinabilidad, menor transferencia de calor, mejores acabados superficiales, excelentes aislantes acústicos y eléctricos, entre otros, permitieron que el plástico lograra posicionarse como uno de los materiales más usados, aunque su costo de fabricación sea elevado. [11]

En la actualidad el mayor problema de los materiales sintéticos es como poder mitigar su alto nivel de contaminación que producen a la hora de ejecutar su disposición final ya que en general cualquier tipo de polímero tarda aproximadamente 200 años en degradarse en forma natural, un tiempo bastante significativo con respecto a la cantidad de residuos que generamos los seres humanos.

El desarrollo de los materiales compuestos desde su invención ha tenido un alcance social completo siendo usados en todo tipo de industria, deportes entre otros, como se observa en la Figura 1-5.

**Figura 1-5** Sectores de aplicación de los composites [11]



Nombre de la fuente: M. Olivares Santiago, C. Galán Marín, and J. Roa Femández, “Los composites: características y aplicaciones en la edificación (composites: characteristics and applications in building construction),” Sevilla,2003.

## 1.2.2 Fibras

Se conoce como fibra a una serie de filamentos que se enlazan entre sí para formar hilos y tejidos. Las fibras pueden clasificarse en dos grandes grupos según su forma de obtención ya sean de origen natural o sintético; aunque el uso de las fibras es más amplio en el campo textil la aplicación de las fibras se encuentra en distintos campos profesionales. [11]

Las fibras naturales son sustancias de origen vegetal, animal y mineral que se pueden moldear en forma de hebras, cordones o hilos. Las fibras naturales a través de procesos de manufactura se convierten en telas, tejidos y bisutería con la cual se fabrican variedad de textiles, elementos de decoración o también como material de recubrimiento [13].

La obtención de fibras naturales tiene sus orígenes desde las primeras civilizaciones donde las telas, las bolsas para carga y los accesorios de su vestimenta y demás eran fabricados con las distintas fibras que se producían.

En la actualidad la variedad de fibras que se encuentran y los productos que se obtienen es inmensa, su costo de producción es bajo con respecto a los materiales sintéticos y a esto se le suma que al ser de origen natural todo lo que se fabrica con fibras naturales al momento de su desecho y descomposición final no causan ningún tipo de contaminación al medio ambiente [13].

Entre las fibras naturales más importantes encontramos (Tabla 1-6):

**Tabla 1-6** Fibras naturales [14].

Nombre	Origen	Composición química básica
Asbesto	Variedades de roca	Silicato de magnesio y calcio
Fibra de coco	Cascara de pistache	Celulosa
Lino	Tallo de lino	Celulosa
Lana	Oveja	Proteína
Capoc	Ceiba	Celulosa

**Tabla 1-6** (Continuación).

Nombre	Origen	Composición química básica
Ramina	Rhea y hierba china	Celulosa
Piña	Hoja de piña	Celulosa
Vello	Cabello de animales	Proteína
sisal	Hoja de agave	Celulosa
Yute	Tallo de yute	Celulosa
Cáñamo	Cáñamo o tallo de abacá	Celulosa
Seda	Gusano de seda	Proteína
Algodón	Cápsula de algodón	Celulosa

Nombre de la fuente: F. Díaz del Castillo, *Conformado de materiales plásticos*. México D.F., 2012

Cabe resaltar que, aunque el asbesto es un material de origen natural utilizado desde hace mucho tiempo como componente de refuerzo de muchos compuestos, el uso de este material en la industria se encuentra prohibido en nuestro país debido a los daños ocasionados a la salud tal cual lo especifica la Ley 061 de 2017.

Las fibras sintéticas se obtienen a partir de la síntesis de distintos compuestos derivados del petróleo, a diferencia de la natural esta no se obtiene sino se fabrica lo cual tiene un costo de producción que es significativo comparado con la fibra de origen natural.

Entre las fibras sintéticas más comunes encontramos (Tabla 1-7):

**Tabla 1-7** Fibras sintéticas [14].

Nombre	Componentes
Metal	aluminio, oro, acero inoxidable, plata etc
Novolodid	Fenol base novolac

**Tabla 1-7** (Continuación).

Nombre	Componentes
Acrílico	Acrilonitrilo
Cristal	Arena de sílice, piedra caliza y otros minerales
Policarbonato	Ácido carbono
Tri acetato	Borra de algodón o madera
Modacrílico	acrilonitrilo
Nylon	Poliamida alifática
Saran	cloruro de vinilideno
Cerámica	Aluminio y sílice
Alzon	Maíz, frijol, etc
Spandex	Poliuretano
Acetato	Borra de algodón o madera
Poliéster	Ácido tereftálico y alcohol dihidrico
Vinyon	Cloruro de vinilo
Caucho	Caucho natural o sintético
Aramida	Poliamidas aromáticas
Fluorocarbon	Tetrafluoroetileno
Olefinas	Etileno y propileno
Rayón	Borra de algodón o madera

Nombre de la fuente: F. Díaz del Castillo, *Conformado de materiales plásticos*. Mexico D.F., 2012

### 1.2.3 Procesos de conformado.

Comprende un amplio grupo de procesos de manufactura, en los cuales se usa la deformación plástica para transformar las formas de las piezas metálicas, plásticas y cerámicas, usualmente se realiza a través de dados de conformación, los cuales transmiten esfuerzos sobre los componentes de trabajo que determinan la forma geométrica a obtener.

Los termoplásticos, formados por polímeros lineales o ramificados, se ablandan cuando son sometidos a temperaturas elevadas y se endurecen al volver a temperatura

ambiente, por otro lado, los termoestables al ser sometidos a temperaturas elevadas ganan dureza y a su vez al alcanzar temperaturas ambientes se vuelven rígidos. En los distintos procesos para dar forma a los plásticos pueden depender del tiempo, temperatura y deformación que sea aplicada en el proceso. [14]

**Tabla 1-8** Métodos de conformado para materiales plásticos [14].

Método de conformado	Productos
Extrusión	Semi acabados, productos intermedios para calandrado, soplado o hilado.
Calandrado	Hojas de materiales, tiras revestidas
Inflado	Hojas y cuerpos huecos
Conformado en caliente	Piezas moldeadas a partir de semi acabados.
Prensado inyección - Prensado.	Piezas de resinas sintéticas y masas comprimibles
Prensado en capas (estratificación)	Productos estratificados a partir de rollos impregnados con resinas sintéticas.
Lienzo de caucho con presión o vacío	Productos estratificados a partir de rollos soporte impregnados con resinas a baja presión
Moldeo por inyección	Modelos, inclusiones, piezas moldeadas.
Centrifugado	Cuerpos huecos con simetría axial o huecos cerrados
Inmersión	Cuerpos huecos o revestimientos
Recubrimiento	Plastificados sobre rollo de papel o tejido.
Arranque de viruta	Transformación de semi acabados, acabados y limpieza de piezas moldeadas.
Inyección por llama	Revestimientos sobre base fija.
Soldadura y encolado	Unión de semi acabados y piezas a partir de los mismos mediante conformado en caliente o arranque de viruta.

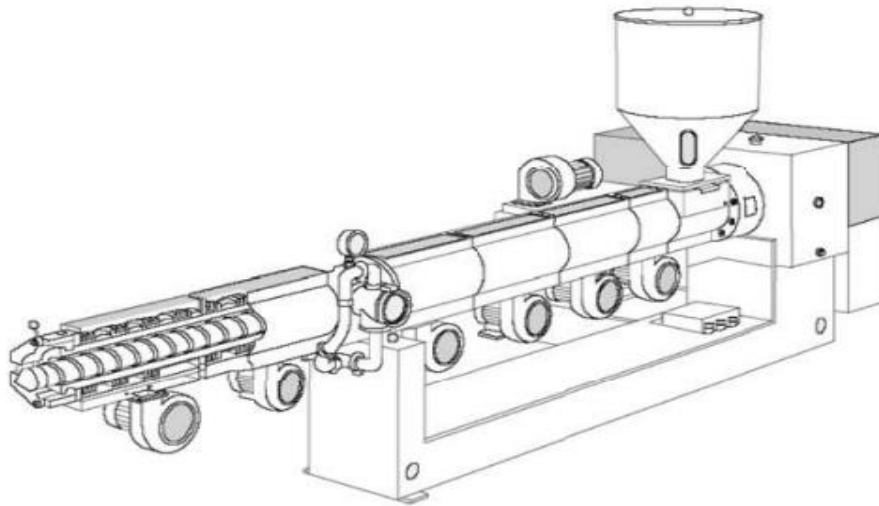
Nombre de la fuente: F. Díaz del Castillo, *Conformado de materiales plásticos*. Mexico D.F., 2012



### 1.2.3.1 Extrusión:

El proceso de extrusión es uno de los procesos más antiguos y más utilizados en la fabricación de productos de plástico y caucho; el proceso consiste en la manipulación de un material polimérico que es sometido a un cambio de temperatura y a una presión constante por medio de un tornillo extrusor que gira internamente en un barril, durante todo el recorrido el material cambia su estado y se vuelve viscoso lo cual permite que se desplace mejor y pueda cubrir todo el volumen del barril. Al final del barril se encuentra un dado como en la Figura 1-7, que cumple la función de boquilla el cual tiene el molde o la preforma que tendrá que tomar el material que está siendo presionado por medio del tornillo de extrusión; luego de atravesar todo el dado sale el polímero ya moldeado a un sistema de enfriamiento o carreteo con el fin de solidificar la pieza y obtener el producto esperado. [10]

**Figura 1-6** Diseño esquemático de línea de extrusión [15]



Nombre de la fuente: T. A. Osswald and J. P. Hernandez Ortiz, *Polymer Processing*. Madison, USA, 2006.

Este método es bastante usado en la producción en línea de piezas que tengan una forma estándar y sin cambios en su área o volumen, por ejemplo es bastante usado en la producción de láminas y tubería de distinto calibre y diámetro respectivamente.

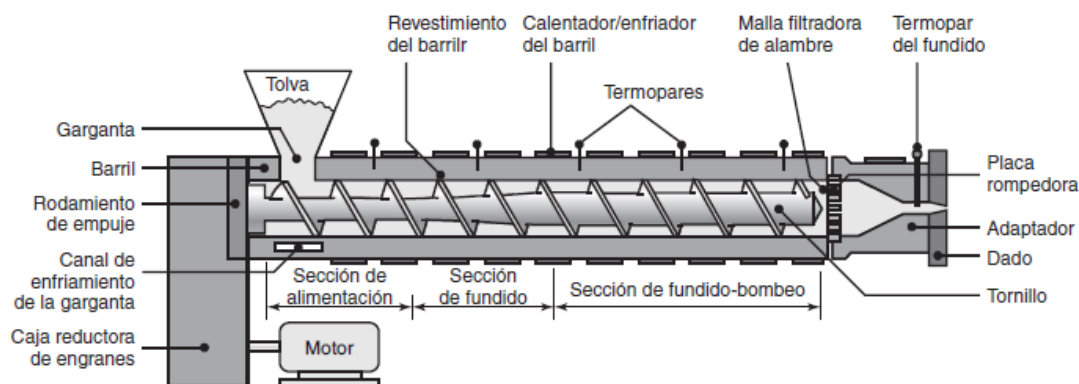
Entre los tipos de extrusoras podemos encontrar dos grandes grupos, las de tornillo sencillo y las que tienen doble tornillo, estas últimas se usan generalmente cuando se debe mezclar varios polímeros o se le deben adicionar pigmentos, adherentes o materiales para reforzar el componente. [16]

El tornillo extrusor no tiene una forma constante durante toda su longitud, debido a que los polímeros se comportan de distintas formas al ser sometidos a altas temperaturas el tornillo extrusor generalmente cambia la relación de paso y tiene forma cónica en ciertas partes de su extensión con el fin de que al final del recorrido el polímero no salga muy viscoso o extremadamente líquido y no permita realizar un moldeo completo cuando entre al dado.

Durante el proceso de extrusión el rendimiento de toda la máquina depende en gran parte de la geometría del tornillo de extrusión y de la velocidad con el que este se encuentre girando. Además de esto la presión que sufre el polímero durante todo su recorrido está directamente relacionado con la profundidad del canal del paso del tornillo, de ahí la necesidad según el polímero de tener varias secciones.

El barril es el que transmite el calor hacia el polímero para que ocurra el respectivo cambio de estado, durante toda su longitud se ubican varias resistencias eléctricas en forma de esposas con la cual se controla la temperatura del cilindro en toda su extensión. Al igual que el tornillo la temperatura también es diferente según su ubicación en el cilindro ya que habrá partes en que la temperatura sea más alta que la otra con el fin de que el polímero no se vaya a quemar dentro del barril pero que sí alcance el punto de viscosidad necesario para el posterior moldeo.

**Figura 1-7** Componentes principales de un extrusor [17]

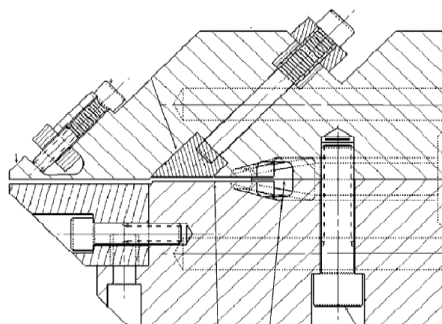


Nombre de la fuente: F. A. Herrera Castañeda, "Ciencia de los polímeros," in *Extrusión*, p. 36

### 1.2.3.2 Dado de extrusión:

Dentro de la línea de extrusión uno de los componentes más importantes es el dado o cabezote, este elemento cumple la función principal de moldear para fabricación de piezas de una longitud significativa y con diseños sencillos o sin variaciones significativas, también es el responsable de la apariencia superficial del producto terminado.

**Figura 1-8** Corte de visto lateral dado de extrusión [17]








Nombre de la fuente: K. Milivoje M and L. G. Reifschneider, "Design of extrusion dies," *Enycl. Chem. Process.*, pp. 633–649, 2006.

Para la fabricación de dados de extrusión es necesario tener en cuenta las dimensiones del producto que se desea extruir, así como el tipo de material con el que se realizará el proceso. El control de temperatura del dado es primordial durante el proceso de extrusión, garantizar un polímero con baja viscosidad, el cual permitirá que el molde sea cubierto en su totalidad, así cuando las piezas finalicen el proceso de moldeo e inicien su solidificación no se obtendrán tantas piezas defectuosas o con áreas sin material fundido.

Entre las geometrías más comunes que se pueden obtener mediante el proceso de extrusión encontramos:

**Tabla 1-9** Productos más comunes obtenidos mediante extrusión [17]

Película	$t < 0.001$ in	
Lámina	$t > 0.001$ in	
Perfiles	tira	
tubos	$d < 1.0$ in	
tubería	$d > 1.0$ in	

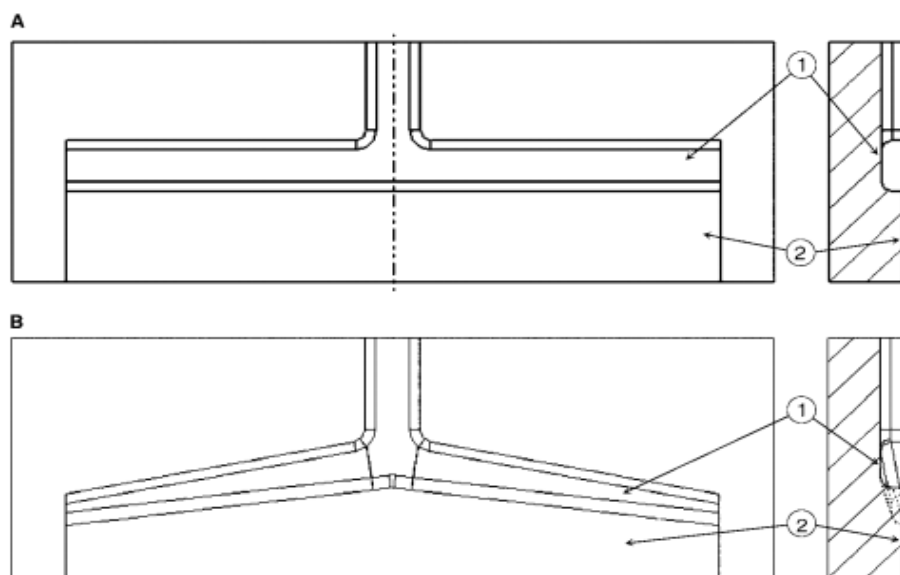
Nombre de la fuente: K. Milivoje M and L. G. Reifschneider, "Design of extrusion dies," *Encycl. Chem. Process.*, pp. 633–649, 2006.

Para cada geometría obtenida se tiene un dado con geometrías específicas que garantizan que el moldeo se cumpla de la mejor manera. Para obtención de película y lámina de plástico se usa un dado muy similar ya que si observamos (Tabla 1-9) la

geometría de ambas es bastante similar variando únicamente el espesor del material a obtener.

Entre los dados más comunes que se conocen para la obtención de polímeros en forma de lámina encontramos el dado en forma de T, dado en forma de cola de pescado (fishtail) y dado en forma de gancho de ropa (coat - hanger). El primer modelo realiza una expansión y distribución del material para obtener las láminas, como se puede observar en la Figura 1-9 su diseño en forma de T causa que durante el proceso al sufrir un cambio tan brusco el material no alcanza a ocupar todos los espacios del área disponible generando deformaciones en el producto final y variaciones en sus dimensiones en especial en el espesor. El modelo de cola de pescado presenta una variación significativa comparada con el diseño presentado anteriormente, para poder permitir que el flujo del material ocupe la mayor parte del área los lados laterales son ubicados de manera angular tal como lo muestra la Figura 1-9 permitiendo que el polímero pudiera ocupar todo el espacio de una forma más sencilla y de cierto modo guiada, este modelo presenta un inconveniente y es que cuando las láminas a obtener son de un ancho significativo el material en las esquinas sufre pérdidas mínimas pero considerables de presión lo cual causa que el espesor de la lámina obtenida se reduzca un poco en los costados o se formen burbujas de aire.

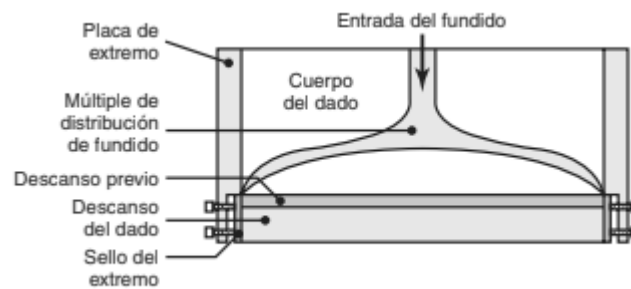
**Figura 1-9** a) dado en forma de T. b) dado en forma de cola de pescado [17]



Nombre de la fuente: K. Milivoje M and L. G. Reifschneider, "Design of extrusion dies,"  
*Encycl. Chem. Process.*, pp. 633–649, 2006.

El modelo de gancho de ropa es el modelo más eficiente comparado con el modelo T y el modelo de cola de pescado; en realidad es muy similar a este último con una leve variación en su diseño ya que, en lugar de tener sus paredes de expansión en línea recta, estas presentan una curvatura lo cual permite que la presión de la entrada se mantenga constante hasta el final de la hendidura.

**Figura 1-10** Geometría de dado en forma de gancho de ropa [18]



Nombre de la fuente: S. Kalpakjian and S. Schmid, *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*,  
5th ed. 2008.

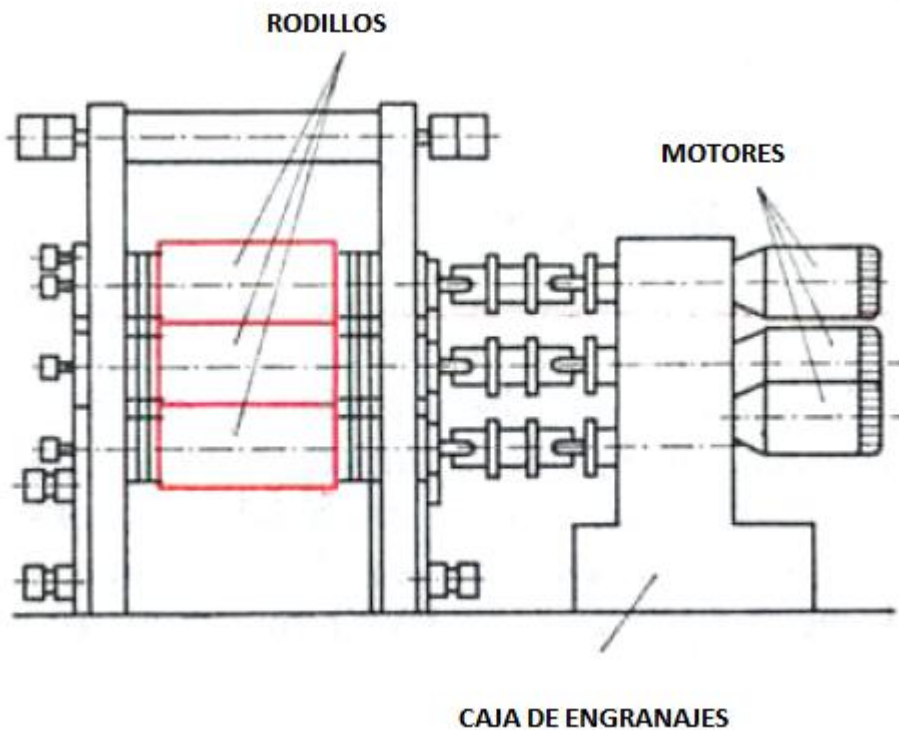
### 1.2.3.3 Calandrado:

Cuando se realiza la producción de piezas de plástico de gran tamaño o de una extensión considerable como los cables o las láminas se hace uso de una herramienta la cual permite guiar, manejar y ordenar el producto obtenido a la salida del dado, cuando el producto que se está obteniendo es laminar se utiliza un sistema de calandrado. [19]

El calandrado es un proceso de transformación de termoplásticos para la fabricación de placas flexibles o semirrígidas de perfil lateral reducido. El proceso consta de mínimo dos rodillos en paralelo los cuales se puede graduar la distancia entre centros, así poder ajustar el espesor con el que se desea obtener la placa [14]

El calandrado aplana y alisa el polímero extruido por medio de la presión que ejercen varios rodillos sobre el material dándole un acabado superficial mucho más limpio (de mejor apariencia y una rugosidad baja), un mismo grosor o calibre para toda la pieza y un mejor manejo del producto final. [19]

**Figura 1-11** Sistema de calandrado [20]



Nombre de la fuente: N. Schott and R. Malloy, "Polymer processing," *Applied polymer science, second edition*. Berlin, pp. 581–607, 1985.

Algunas calandras traen sistemas de refrigeración vinculados los cuales ayudan a que el proceso de solidificación del polímero suceda de manera mucho más rápida y así poder realizar una producción más alta en un tiempo de procesado más cortó.

Para la producción en volumen de implementos de plástico la extrusión es la forma más eficiente y económica de obtenerlos; solo es necesario establecer parámetros de la pieza

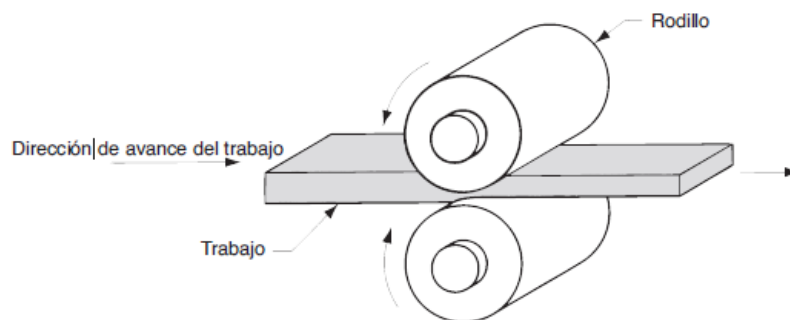
al inicio y la máquina puede funcionar de manera constante siendo interrumpido el proceso únicamente por una falla o percance significativo. Sin embargo, este proceso está restringido ya que los productos que se van a fabricar deben contener un diseño transversal estándar, es decir no se pueden obtener piezas con distintas formas al mismo tiempo. Entre los productos más comercializados que se obtiene a partir de la extrusión de plástico tenemos tuberías, láminas y películas para distintas industrias, bolsas, persianas, etc. [20]

#### 1.2.3.4 Laminado:

Hoy en día es uno de los procesos de conformado de metales más importantes en la industria. En la actualidad aproximadamente el 95% de los metales y aleaciones se procesan a través de este proceso. A través de este proceso se obtiene placas, láminas, tiras, rieles, vigas, canales, ángulos, barras, varillas y tubos sin costura, etc., Dichas deformaciones se obtienen a través de un sometimiento del material a altos esfuerzos de compresión mediante el paso del material a través de dos rodillos giratorios.

En este proceso se pueden obtener distintos espesores a través del ajuste de la separación entre los rodillos, así se pueden obtener rollos planos o acanalados reduciendo la separación entre los rodillos generando una sección transversal reducida. [21]

**Figura 1-12** sistema de laminación [22]



Nombre de la fuente: M. P. Groover, *fundamentos de manufactura moderna*, 3rd ed. Mexico D.F., 2007. Pag 391



Se tiene en cuenta que una de las ventajas más significativas que brinda la creación de nuevos materiales compuestos es la de poder mitigar el impacto ambiental que genera los polímeros durante su descomposición ya que, aunque se sabe que algunos polímeros permiten realizar procesos de reciclaje para su reutilización, hay polímeros con los que no es posible reutilizar y su descomposición es considerablemente nociva para el medio ambiente. El uso de productos naturales como refuerzo permite reducir la cantidad de material polimérico usado y así mismo los residuos nocivos generados disminuyen al momento de ser desechados.

#### **1.2.4 Teoría de falla - Von Mises.**

Se considera falla en el diseño de ingeniería a la pérdida de funcionamiento de un elemento ya sea por deformación o fractura de su estructura. Una buena selección de material, un sistema de sujeción o acople entre piezas adecuado y un análisis de esfuerzos realizado correctamente permitirá que el diseño y fabricación de elementos sea confiable. [22]

La teoría de la energía de distorsión o Von Mises establece que: “La falla se producirá cuando la energía de distorsión por unidad de volumen debida a los esfuerzos máximos absolutos en el punto crítico sea igual o mayor a la energía de distorsión por unidad de volumen de una probeta en el ensayo de tensión en el momento de producirse la fluencia”. La energía de distorsión es la diferencia entre la energía total de deformación por unidad de volumen y la energía de deformación por unidad de volumen debida a los esfuerzos hidrostáticos. [22]

La energía de deformación  $U$  se puede definir como el área bajo la curva de esfuerzo-deformación hasta el punto del esfuerzo aplicado. En un estado tridimensional la deformación se representa de la siguiente manera:

$$U = \frac{1}{2}(\sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \sigma_3 \varepsilon_3)$$

**Ecuación 1** Energía de deformación.

La energía de deformación debida a los esfuerzos hidrostáticos  $U_h$  es:

$$U_h = \frac{3(1-2\nu)}{2E} \sigma_h^2 = \frac{3(1-2\nu)}{2E} \left( \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \right)^2$$

**Ecuación 2** Esfuerzo hidrostático

Por ende, la energía de distorsión es:

$$U_d = U - U_h$$

$$U_d = \frac{1+\nu}{3E} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_1\sigma_3)$$

**Ecuación 3** Energía de distorsión.

Cuando se practica el ensayo de tensión, al producirse la fluencia tenemos que:

$$\sigma_2 = \sigma_3 = 0, \sigma_1 = S_y$$

Y reemplazando los valores de los esfuerzos tenemos que:

$$U_d = \frac{1+\nu}{3E} S_y^2$$

**Ecuación 4** Energía de distorsión

Igualando las ecuaciones de distorsión como lo plantea la teoría tenemos que el esfuerzo de Von Mises  $\sigma'$  está representado por la ecuación:

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_1\sigma_3} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}}$$

**Ecuación 5** Esfuerzo de Von Mises

Y la falla se presenta cuando:

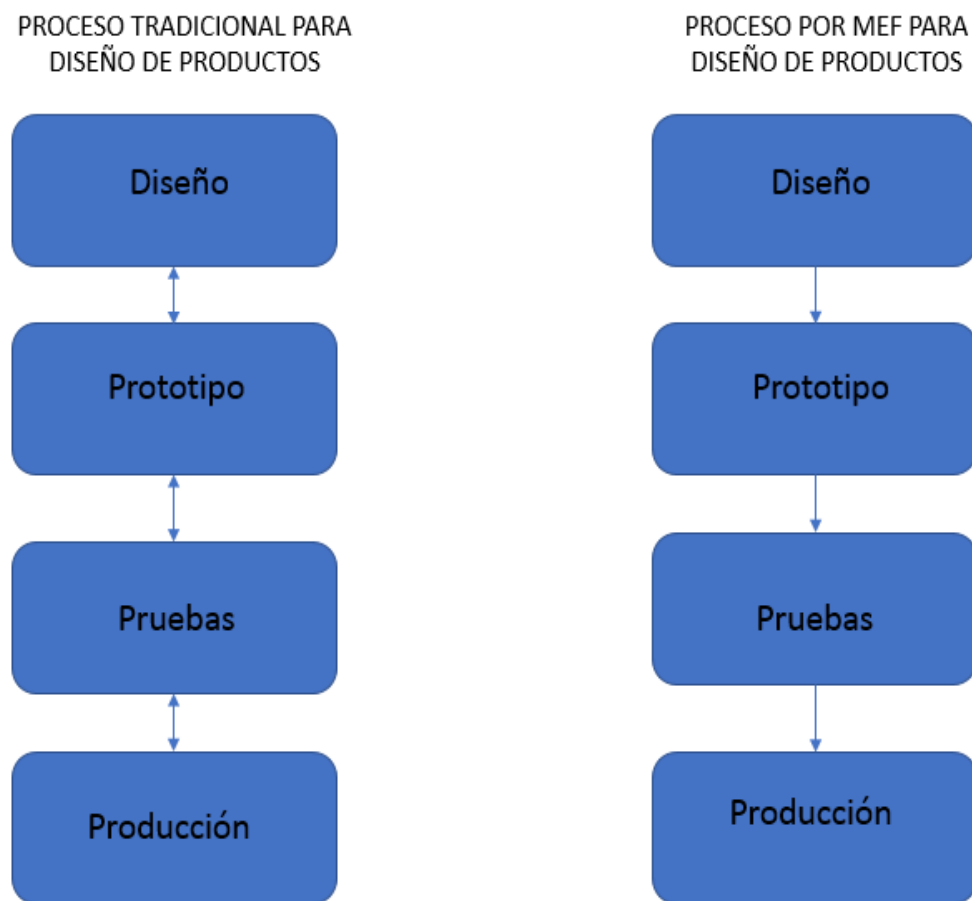
$$\sigma' = S_y$$

**Ecuación 6** Condición de falla

## 1.2.5 Método de elementos finitos.

El análisis por elementos finitos o método de elementos finitos (MEF) es una herramienta de diseño utilizada en ingeniería la cual ha permitido modificar el proceso de diseño a un sistema más práctico y eficiente.

**Figura 1-13** Estructura del proceso de diseño [23]



Nombre de la fuente: P. M. Kurowski, *Teaching Finite Element Analysis for Design Engineers*. 2011.

El proceso de diseño en ingeniería está conformado por una etapa de diseño donde se realiza todo el proceso matemático correspondiente, una fabricación de prototipo donde se realiza todo el proceso de manufactura del producto, una serie de ensayos y pruebas

realizadas con el prototipo y una producción final cuando el prototipo ha superado todas las pruebas y está aprobado para ser producido en masa. Como se observa en la Figura 1-13 los pasos de diseño usados por el método de elementos finitos son los mismos que el método tradicional, sin embargo, el procedimiento tradicional es un proceso rotativo basado en la pruebas y detección de errores que presente el prototipo fabricado, teniendo en cuenta esto para la producción de un producto diseñado que cumpla con la calidad especificada tuvieron que ser fabricados, probados y modificados distintos prototipos hasta lograr el prototipo ideal. Con el método de elementos finitos todo prototipo puede ser simulado y validado matemáticamente antes de ser fabricado reduciendo así el tiempo de diseño y fabricando un solo prototipo para realizar pruebas finales. [23]

La simulación por elementos finitos parte de un concepto con el cual se puede estructurar todo tipo de diseño, su geometría. Cualquier producto puede ser descrito por una serie de superficies, volúmenes, curvas significativas donde se pueden establecer que en estos sitios puede haber un cambio importante que puede ser plasmado matemáticamente. El MEF se basa en la formulación variable de un problema de valor límite, las funciones desconocidas se aproximan a funciones polinómicas siendo estas un modelo matemático sencillo. Cada función polinómica es seccionada por mallas y estas mallas están fraccionadas por nodos o elementos.

## 2 Capítulo 2

### 2.2 Metodología de diseño.

El objetivo principal de este proyecto es poder obtener un producto final con ciertas especificaciones y características tanto las solicitadas por el cliente, así como las generales de diseño mecánico. Luego de realizar una investigación se tomó la decisión de realizar un híbrido entre dos metodologías reconocidas. Se tomaron conceptos de la metodología de Shigley y conceptos de la metodología de Norton formando así una metodología que se adapta de la mejor manera a las necesidades de nuestro diseño [24], [25].

Basado en esta metodología se establece el siguiente modelo a desarrollar (Tabla 2-1):

**Tabla 2-1** Modelo de metodología.

Paso de metodología	Desarrollo
Reconocimiento de la necesidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desarrollar una nueva presentación de material compuesto entre LDPE y fibras de fique.</li> <li>• Obtener el compuesto en forma de lámina.</li> <li>• Adaptar el sistema a diseñar a la línea de extrusión de la universidad ECCI.</li> </ul>
Definición del problema	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cómo obtener un material compuesto entre LDPE y fibras largas de fique en forma laminar.</li> <li>• Diseñar un sistema de laminación que permita la unión entre los materiales anteriormente mencionados, garantizando la correcta adherencia entre ellos.</li> <li>• Analizar y determinar entre un sistema de calandrado y uno de laminado cual cumple con las necesidades del diseño.</li> </ul>

**Tabla 2-1** (Continuación).

Paso de metodología	Desarrollo
Síntesis	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Analizar posibles formas de obtener láminas de plástico mediante extrusión.</li> <li>● Estudiar las propiedades necesarias del material para poder obtener la correcta adherencia.</li> <li>● Seleccionar las piezas a diseñar para poder alcanzar el objetivo principal.</li> <li>● Diseñar boceto básico de elementos a fabricar, elección de materiales y cumplimiento de requerimientos básicos de diseño.</li> </ul>
Diseño detallado	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Diseño detallado de piezas a fabricar, análisis mecánico general.</li> <li>● Generación de planos detallados de diseño.</li> </ul>
Prototipos y pruebas	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Fabricación de piezas diseñadas.</li> <li>● Ensamble y adecuación del nuevo sistema a la máquina de extrusión de la ECCI.</li> <li>● Puesta en marcha, evaluación y ajuste del equipo.</li> </ul>
Producción	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Resultado final obtenido a través del sistema.</li> <li>● Entrega de documentación del proyecto.</li> </ul>

Nombre de la fuente: Imagen de los autores

Antes de iniciar todo el proceso de diseño se realiza un análisis de los recursos con los que se cuentan en el momento. La máquina peletizadora del laboratorio de plásticos de la universidad ECCI hace parte de un proyecto de grado de ingeniería mecánica del año 2013 en la cual toman el sistema de extrusión y lo re potencializan hasta dejarlo como se observa en la figura 2-1. La máquina cuenta con las siguientes características técnicas:

**Tabla 2-2** Datos técnicos Peletizadora.

Potencia	3 HP
Voltaje	220 V
Corriente	6,3 A
Husillo	1"
Velocidad del Husillo	60 RPM
Capacidad de tolva	3,8 Kg

Nombre de la fuente: Imagen de los autores

**Figura 2-1** Peletizadora, camisa de extrusión, U. ECCI.

Nombre de la fuente: Imagen de los autores

La camisa de extrusión cuenta en su estructura con un sistema de calentamiento mediante resistencias térmicas adaptadas al contorno del cilindro de extrusión; cada resistencia cuenta control independiente de temperatura lo cual permite que la

temperatura de la camisa no sea la misma en todas partes y permitiendo así un mejor comportamiento del polímero durante su transformación termoplástica.

La máquina peletizadora cuenta con un dado de extrusión el cual hace el moldeo del polímero obteniendo hilos de plástico, estas hilazas pasan por una piscina de enfriamiento para solidificar el material y posteriormente poder triturarlo y convertirlo en pellets.

**Figura 2-2** Peletizadora, tolva de refrigeración, U. ECCI.



Nombre de la fuente: Imagen de los autores

Sabemos que uno de los requerimientos solicitados por los líderes de proyecto es que se pueda obtener el material compuesto en forma de lámina y usando tiras largas de fique, es necesario realizar unas pruebas de laboratorio para poder tener conocimiento de las propiedades mecánicas con las que contará el material compuesto y así tener información básica que se usará posteriormente para realizar los cálculos de diseño del sistema.



Para iniciar con el diseño es necesario conocer el coeficiente de resistencia a la tensión del material compuesto ya que este dato nos permitirá conocer la carga máxima que puede soportar el material, para esto se fabricaron varias probetas de polietileno de baja densidad con refuerzo de malla de fique; se tomaron distintas cantidades del polímero para generar probetas de distinto espesor, se calentó el material hasta alcanzar un estado visco elástico con el que se pudiera realizar la impregnación del polímero sobre la malla de fique. Para poder garantizar que la impregnación fuera profunda y ocupar todas las cavidades del enmallado de la fibra se aplicó una presión a los dos materiales con la prensa hidráulica lo cual permitió que estos se adhieren mucho mejor.

Con las probetas ya fabricadas se realizan las pruebas de tensión usando la máquina universal de ensayos TINIUS OLSEN H10KS perteneciente al laboratorio de materiales de la universidad ECCI.

El equipo cuenta con las siguientes características técnicas (Tabla 2-3):

**Tabla 2-3** Datos técnicos máquina universal de ensayo TINIUS OLSEN H10KS.

Capacidad	10 KN
Espacio entre columnas	405 mm
Recorrido máximo entre mordazas	1100mm
Rango de velocidad de test	0,001 a 1000 mm/min
software	propio del equipo

Nombre de la fuente: Imagen de los autores

**Figura 2-3** Máquina universal de ensayo TINIUS OLSEN H10KS.



Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

Para el análisis de esfuerzos y deformaciones se usará la teoría del método de elementos finitos, para la validación de estos datos se escogió el software ANSYS 17 WORKBENCH ya que es uno de los programas más completos para análisis mecánicos y por disponibilidad del software en la universidad. El software se encuentra instalado y funciona correctamente en un computador de 64 bits con memoria RAM de 6 Gb y un procesador Intel Core 2, cuatro núcleos, 2.66 GHz.

### 3 Diseño básico

Durante cualquier proceso de diseño mecánico uno de los objetivos principales es calcular los esfuerzos a los que será sometida la pieza, así como las deformaciones que pueden ocurrir durante su operación. Teniendo en cuenta esto se plantean las siguientes consideraciones que se tendrán en cuenta durante todo el proceso de diseño:

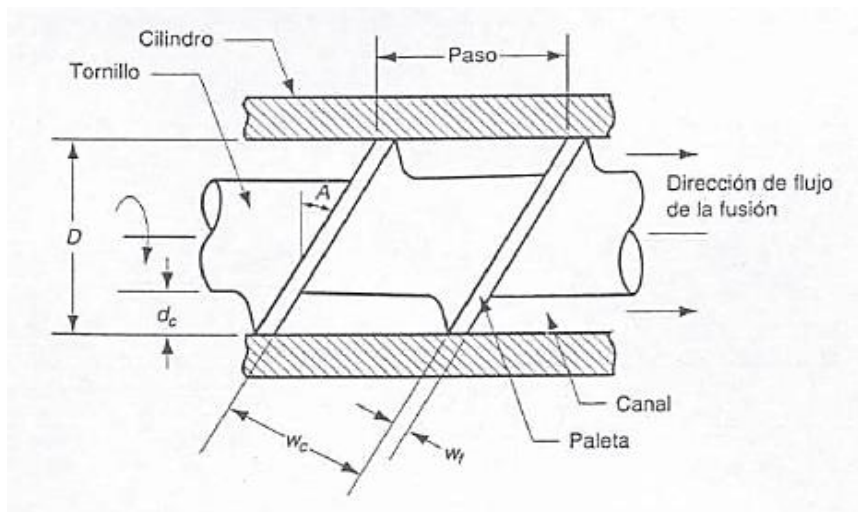
- Se debe elaborar el diseño procurando que el ensamble cuente con la menor cantidad de piezas posibles.
- Buscar la sencillez en la geometría pensando en el proceso de maquinado.
- El área donde se ubicarán los sistemas de sello o fijación tales como tornillos, acoples, zeeger y demás deberá ser lo más uniformes posibles y estar ubicadas estratégicamente para no sobrecargar ningún elemento o generar esfuerzos adicionales al modelo.
- La selección del material de todas las piezas debe estar enfocado en la resistencia a altas temperaturas ya que todo el modelo estará sometido a cambios de temperatura significativos.
- La superficie del canal de flujo por donde se desplazará el polímero debe tener un acabado superficial de alta calidad mitigando cualquier porosidad o imperfección que pueda modificar la geometría que tomará el fluido durante su recorrido.
- El ensamble del sistema debe ser lo más sencillo posible pensando en procesos de mantenimiento y/o limpieza.
- La tornillería que será usada debe ser lo más grande y en la menor cantidad posible, esto con el fin de garantizar un ensamble sencillo pero confiable.

## 3.2 Parámetros iniciales

Por solicitud del cliente se establece que el dado a diseñar debe permitir:

- Generar láminas de polímero de espesor 10 mm.
- El ancho de la lámina que se generará será de 150 mm fijo.
- Debe permitir graduar el caudal de la salida del material.
- Las piezas que conformen el diseño deben cumplir con estándares de diseño mecánico para garantizar un tiempo de vida acorde a su uso.
- Se buscará el diseño más sencillo que permita un procedimiento de ensamble lo más simple posible.

Partiendo de las características técnicas que presenta la extrusora a la que se le adaptará el dado a diseñar, es necesario conocer la presión y el caudal que genera el tornillo extrusor sobre el material. La velocidad y el volumen del material movilizado a lo largo de la camisa de extrusión parte del concepto de transporte de flujo por arrastre, el tornillo extrusor gira concéntricamente al interior de la camisa de extrusión empujando el material en una dirección específica y generando una presión de este sobre la geometría que se presenta al final del recorrido donde el proceso de extrusión finaliza. La geometría del tornillo extrusor y la velocidad de rotación es parte fundamental del comportamiento del material a través de su recorrido; la Figura 3-1 presenta las principales partes del tornillo de extrusión:

**Figura 3-1** Tornillo de extrusión [26]

Nombre de la fuente: M. P. Groover, "Procesos de conformado para plástico," in *Fundamentos de manufactura moderna*, 3rd ed., Mc Graw Hill, Ed. 2007, pp. 258–306.

Tomando las medidas del tornillo de la camisa de extrusión tenemos que:

**Tabla 3-1** Datos técnicos tornillo de peletizadora.

Símbolo	Nombre	Valor
$D$	Diámetro de aleta	0,031m
$W_c$	Paso- distancia entre aletas	0,025m
$W_f$	Espesor de la aleta	0,085m
$D_c$	Canal de distribución	0,055m
$A$	Ángulo de la hélice	$17^\circ$

Nombre de la fuente: Imagen de los autores

Teniendo en cuenta la geometría podemos decir que el caudal máximo a una velocidad  $N$  de 60 rpm puede calcularse de la siguiente manera:

$$Q_{max} = 0,5\pi^2 D^2 N d_c \text{sen}A \cos A$$
$$Q_{max} = 0,0000006112595298 \text{ m}^3 \text{ s}$$

**Ecuación 7** Caudal máximo

La presión máxima que genera el tornillo teniendo en cuenta que la longitud total de este es de  $L= 0,71\text{m}$  es:

$$P_{max} = \frac{6\pi DNL \cot A}{d^2}$$
$$P_{max} = 0,03710 \text{ MPa}$$

**Ecuación 8** Presión máxima

### 3.3 Laboratorios.

#### 3.3.2 Prueba de caudal.

Para conocer el caudal y la velocidad aproximada de salida que tendrá el material al final de su recorrido por el dado a fabricar, se realizó un ejercicio práctico en el que mediante una serie de mediciones realizadas a la línea de extrusión con el dado generador de fibra para pellets en funcionamiento se calculó la velocidad con la que el tornillo de extrusión se debe desplazar para poder cubrir toda el área del dado y poder obtenerse láminas del espesor deseado.

**Figura 3-2** Impregnación de yute con polietileno de baja densidad.



Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

Mediante el uso de una cinta métrica se tomó la longitud que alcanza el polímero en forma de fibra para pellets en un minuto para calcular la velocidad promedio de salida obteniendo un valor de:

$$V = 0,8064 \text{ m/min}$$

**Ecuación 9** Valor de velocidad de extrusión experimental.

Aplicando la fórmula de caudal:

$$Q = V * A$$

**Ecuación 10** Caudal

y sabiendo que el área de salida del dado instalado es de:

$$A = \pi * R^2 * 6$$

**Ecuación 11** Área de salida de material dado pellet.

(El área total corresponde al área del círculo de cada salida por la cantidad de salidas que tiene el dado que en este caso son 6).

$$A = 1,178E - 04 \text{ m}^2$$

**Ecuación 12** Áreas obtenidas del dado de pellet.

tenemos que el valor del caudal es de:

$$Q = 9,501E - 05 \text{ m}^3/\text{s}$$

**Ecuación 13** Caudal obtenido del dado de pellet.

Ahora tomando los datos obtenidos de caudal se despejará la velocidad del fluido teniendo en cuenta el cambio de área que habrá con respecto a la geometría que tiene el dado a diseñar; teniendo en cuenta que el ancho de la lámina a obtener es de 150 mm y el espesor máximo será de 10 mm entonces el área es:

$$A = B * H$$

$$A = 0,15 * 0,010 = 0,0015 \text{ m}^2$$

**Ecuación 14** Área obtenida para dado plano



entonces:

$$V = Q/A$$

$$V = \frac{9,501E - 05 \text{ m}^3\text{s}}{0,0015\text{m}^2} = 0,0633\text{m/s}$$

**Ecuación 15** velocidad a partir de fórmula elemental caudal.

La velocidad de salida del fluido en el dado de extrusión es de 0,0633 m/s, teniendo en cuenta esta información podemos calcular el promedio de velocidad que debe manejar los rodillos del sistema de laminación a fabricar ya que el sistema debe ir a una velocidad promedio similar a la del polímero a baja viscosidad. Teniendo claro esto tenemos que la velocidad la podemos expresar de la forma  $w = \omega * R$  donde  $W$  representa la velocidad angular y  $R$  representa el radio que tendrá los rodillos de laminación, teniendo en cuenta esto la velocidad angular es:

$$w = \frac{0,0633 \text{ m/s}}{0,0255 \text{ s}} = 0,3953 \text{ RPM}$$

**Ecuación 16** Velocidad angular

### 3.3.3 Pruebas de tensión

Se fabricaron 5 probetas con las siguientes características (Tabla 3-2):

**Tabla 3-2** Características de las probetas.

Probeta	Características
Probeta #1	Yute de 1 mm de espesor.
Probeta #2	material compuesto entre yute y LDPE de 2,4 mm de espesor.
Probeta #3	Material compuesto entre yute y LDPE de 2,5 mm de espesor.
Probeta #4	Material compuesto entre yute y LDPE de 3,5 mm de espesor.
Probeta #5	LDPE de 2,3 mm de espesor.

Nombre de fuente: Imagen de los autores.

Las probetas se fabricaron cumpliendo las especificaciones establecidas en la norma NTC 595 de método de ensayo para determinar las propiedades de tensión en plásticos.

**Figura 3-3** Probetas para pruebas de tensión densidad.



Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

Para las pruebas de esfuerzo el software del equipo solicita que se ingresen los siguientes parámetros para cualquier probeta:

- Área de la probeta.
- Longitud calibrada.
- velocidad de desplazamiento de las mordazas.

Para todas las probetas se usó la misma velocidad de desplazamiento de 40 mm/min.

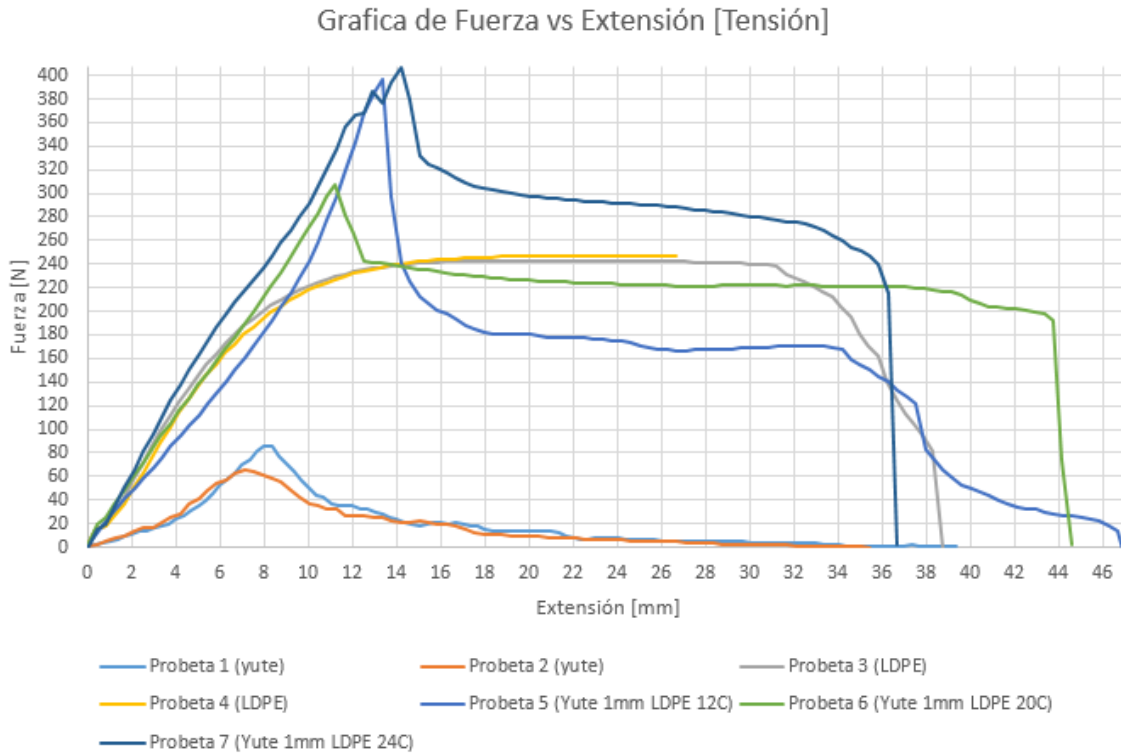
**Figura 3-4** Probeta instalada en máquina universal de ensayos.



Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

Luego de practicar las pruebas correspondientes a cada una de las probetas con los datos obtenidos se realizó la siguiente gráfica comparativa entre la fuerza y la extensión que sufrió cada probeta.

**Figura 3-5**      Grafica de fuerza vs extensión a tensión.



Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

Como se puede observar en la Figura 3-5 la fuerza máxima de extensión que puede soportar el material antes de fracturarse es de aproximadamente 420 N, este dato se estableció como una fuerza máxima que puede soportar el material compuesto teniendo en cuenta que aunque la operación de la línea de extrusión se realiza con una temperatura alta (trabajo en caliente) al ser este un dato realizado en frío puede fijarse como un valor máximo con un factor de seguridad considerable con respecto al comportamiento que tendrá el material a una alta temperatura.

### 3.3.4 Prueba de compresión

La siguiente prueba de laboratorio se realizó también con la máquina universal de ensayos TINIUS OLSEN, para esta prueba se realizaron dos probetas de LDPE y fibra de yute diseñadas en forma de cilindro ya que esta geometría permite realizar la prueba de compresión de una manera sencilla y la fabricación de esta probeta es de baja complejidad comparada con las otras opciones que se pudieron tener en cuenta.

**Figura 3-6** Prueba de compresión de material compuesto.



Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

Las probetas son de un diámetro de 21 mm y una altura de 24,65 mm, aplicando la fuerza de compresión a una velocidad de 15 mm/ min se obtuvieron los siguientes resultados:

**Figura 3-7** Gráfica esfuerzo vs deformación a compresión.



Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

cómo se puede observar la probeta 2 nos permitió evidenciar realmente un cambio hasta un punto máximo donde la probeta sufre deformación total mientras que la probeta 3 recibe la carga total de la máquina sin realmente generar una información relevante o esperada. Tomando la información de la probeta 2 el esfuerzo máximo que soportó la probeta a la compresión fue de 24 MPa con una deformación de 0,8 mm. Así mismo como la prueba de tensión este resultado nos permite establecer un límite máximo del comportamiento del material compuesto al recibir una carga a compresión, de igual manera este valor tomado en frío es mucho más alto del que se podrá obtener en algún momento cuando el material se encuentre fluidizado en caliente.

### 3.3.5 Prueba de presión en rodillos

Para poder elegir las características técnicas que deben tener los motores que irán conectados al tren de laminación es necesario conocer la fuerza necesaria y la presión que se requiere para que los rodillos al entrar en contacto con el polímero fluidizado y la fibra natural logren que estos se unan y se pueda obtener una impregnación homogénea en presentación laminar.

**Figura 3-8** Mecanismo de medición.

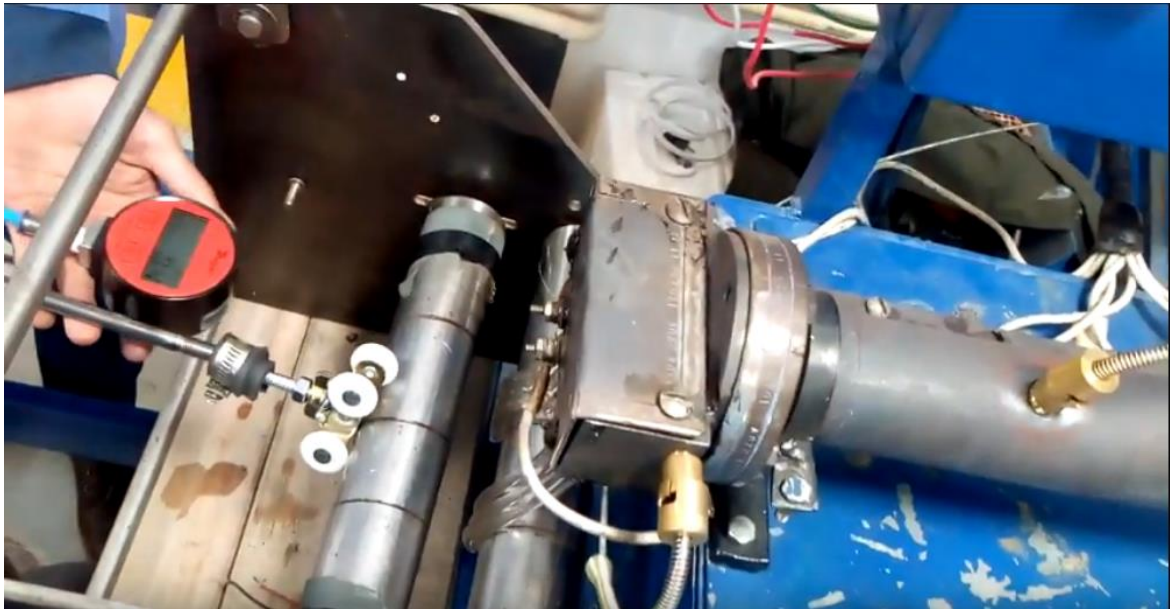


Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

Para esto se realizó una prueba con un sistema de rodillos con el que se contaba; simulando el proceso de laminado. Mediante la elaboración de un instrumento que medición de presión fabricado con un pistón neumático, un sistema de rodachinas y un manómetro digital verificado se logró observar la presión necesaria que debe ejercer los rodillos sobre el material fluidizado para poder impregnarse sobre la fibra de yute.



**Figura 3-9** toma de presión ejercida por los rodillos sobre el material.



Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

Un sistema de rodachinas usadas para puerta de corredera en gabinetes o closets es adaptado a la punta del émbolo del pistón neumático tal como se puede observar en la Figura 3-9. A una de las entradas de aire del pistón se instaló un manómetro digital y en la otra entrada simplemente se colocó un tapón para sellar por completo la cámara de vacío. Mientras los rodillos se encuentran girando, con el pistón se aplica una fuerza sobre uno de los rodillos; como el polímero fluidizado está pasando por el medio de los dos rodillos al juntar estos se genera una presión sobre el material el cual sufre una transformación en su geometría pasando de varios hilos de plástico a convertirse en una lámina uniforme de material.

La presión ejercida con el pistón es observada a través del manómetro digital, los resultados obtenidos por la práctica nos indican que 12 psi como valor máximo que



equivalen a 0,07584 MPa en sistema internacional. Teniendo en cuenta este valor y aplicando la fórmula de presión:

$$P = \frac{F}{A}$$

**Ecuación 17** Básica de presión.

Tenemos entonces que la fuerza necesaria para una impregnación ideal del polímero sobre la fibra a través del laminado por rodillos es de:

$$F = P * A$$

$$F = 82737,1 * (\pi * 0,0125^2) = 40,614N$$

**Ecuación 18** Despeje de fuerza.

**Figura 3-10** Material compuesto obtenido durante el laboratorio material.



Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

### 3.4 Selección de material.

La selección de los materiales que serán utilizados para la fabricación del dado de extrusión y para el sistema de laminación por rodillos deben responder satisfactoriamente a unas necesidades mecánicas primordiales que garanticen el correcto funcionamiento del sistema, así como su durabilidad y su calidad como herramienta de moldeo.

Los materiales usados para la fabricación del dado y del sistema de rodillos deben cumplir con:

- Alta resistencia a la presión, altas temperaturas y corrosión.
- Tener alta conductividad térmica.
- Permitir un acabado superficial de alta calidad.
- No tener porosidad en su superficie ni tender a presentar este fenómeno.
- Buena maquinabilidad.
- Buena resistencia a la tracción.

Teniendo en cuenta estas características e investigando sobre los materiales más usados para este tipo de sistemas se tuvieron en cuenta las siguientes opciones de material para la selección (Tabla 3-3):

**Tabla 3-3** Características de los materiales [24].

Material/ Características	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	Resistencia a la tracción (MPa)	Límite de Fluencia (MPa)	Dureza (HB)
Acero P20	7,86	1080	8139,52	310
Acero SAE 4140	7,85	980,6650	6443420,156	321
Acero SAE 4340	7,84	1110,00	7256,92	340
Acero 1045	7,85	657,0456	3846815,369	190
Acero SAE 1020	7,86	655	2647,8	140
Acero ASTM A 36	7,85	400	2451,66	135

Nombre de la fuente: R. L. Norton, *Diseño de máquinas*, 4th ed. Prentice Hall.

Adicional a las características técnicas y mecánicas que deben cumplir los materiales, es necesario evaluar otros conceptos como lo es el costo del material, su disponibilidad en el mercado, el costo de maquinabilidad entre otros.


### 3.5 Bocetos.

Antes de escoger el diseño a fabricar, analizaremos los posibles sistemas que se puedan fabricar. (Tabla 3-4)

**Tabla 3-4** Opciones de diseño.

Funciones	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Accionamiento de rodillos	 Accionamiento manual	 Accionamiento mecánico- motor	
Transmisión de potencia	 Cadena	 Poleas	 Caja reductora piñón
Sistema de Calentamiento	 Resistencia plana	 Resistencias tipo cartucho	 Resistencia tipo abrazadera con recubrimiento cerámico
Sistema de nivelación de rodillos	 Tornillo de desplazamiento	 Pistón neumático	

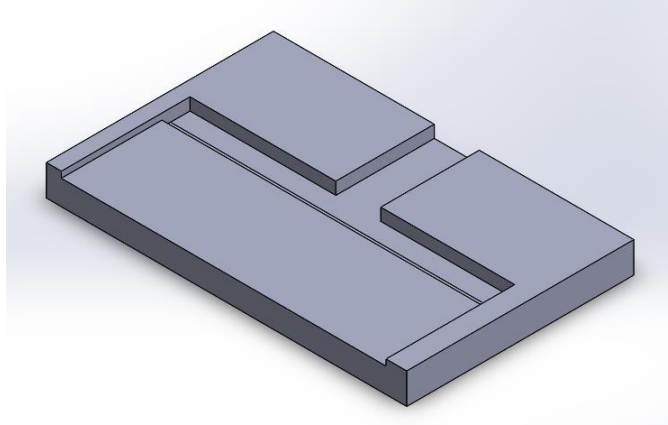
**Tabla 3-4** (Continuación).

Funciones	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Presentación de la fibra	 Fique en madeja	 Rollo de fique en tela	
Sistema de enfriamiento	 natural- ambiente	 Mecánica-ventilador	

Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

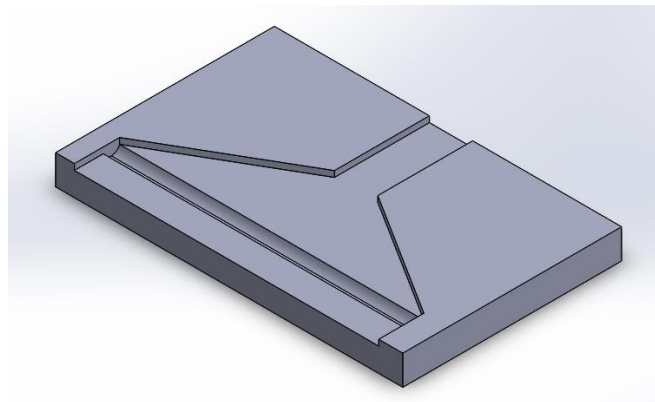
### 3.5.2 Opciones de dado.

**Figura 3-11** Dado N°1.



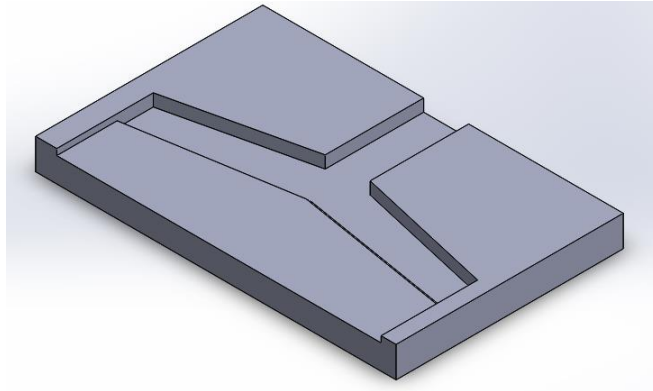
Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

**Figura 3-12** Dado N°2.



Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

**Figura 3-13** Dado N°3.



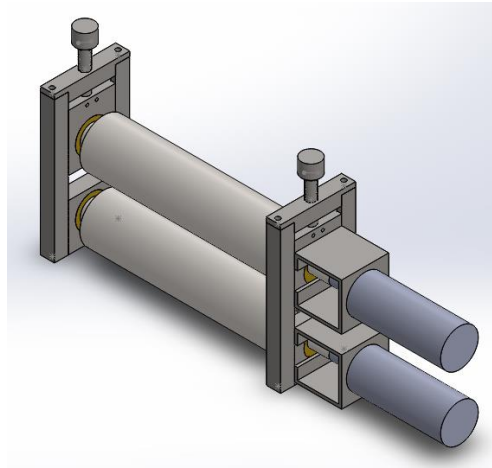
Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

### 3.5.3 Opciones de sistema de laminación.

#### 3.5.3.1 Solución N°1

El equipo consta de dos rodillos macizos con desplazamiento controlado a través de dos tornillos independientes que permiten el desplazamiento en el eje vertical, cada rodillo posee un motorreductor a 12 VDC los cuales se pueden regular su velocidad a través de una fuente variable de voltaje, los motores están ensamblados con los rodillos a través de un acople rígido, esta solución requiere una fuente de voltaje de 110V para los motorreductores.

**Figura 3-14** sistema de laminación con tornillo de ajuste de presión y motor reductor individual.

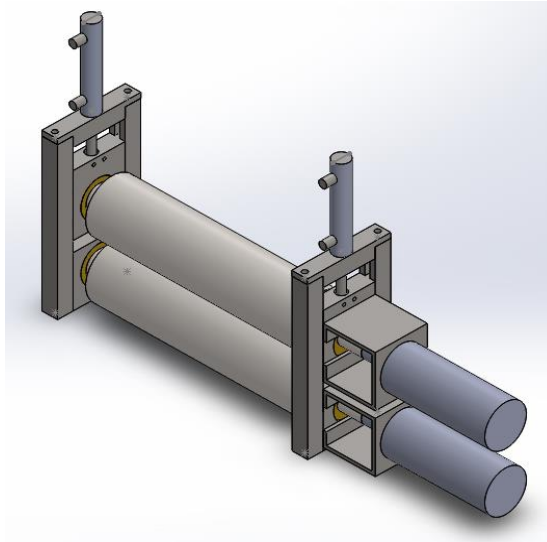


Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

#### 3.5.3.2 Solución N°2

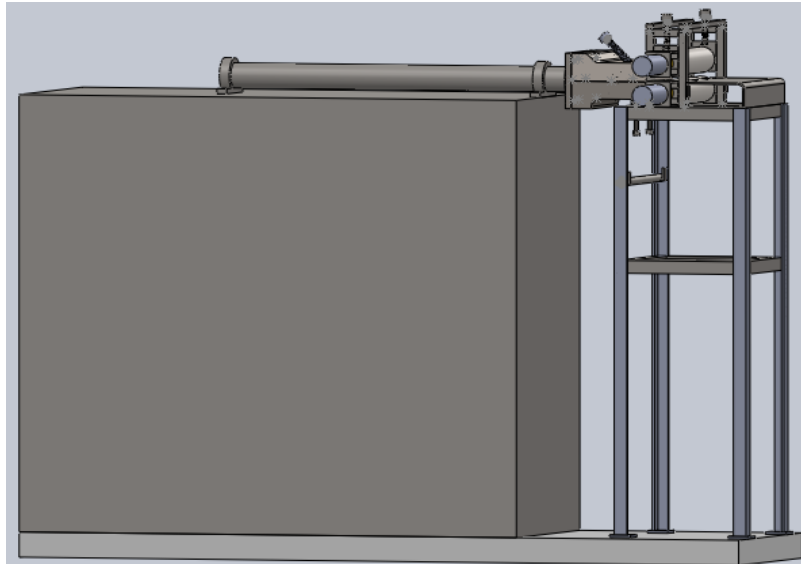
Este equipo de esta solución difiere únicamente a la solución N°1 en el mecanismo de control del desplazamiento del rodillo superior en el eje vertical, en esta solución se plantea el uso de pistones neumáticos con sensor de posición, para esta solución requiere una fuente de voltaje de 110V para los motorreductores, una fuente regulable de aire comprimido y un sistema electroneumático para el control de posición.

**Figura 3-15** sistema de laminación con pistón neumático para ajuste de presión y motor reductor individual.



Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

**Figura 3-16** Diseño preliminar.



Nombre de la fuente: Imagen de los autores.



### 3.6 Diseño térmico de dado.

Para que el polímero fluidizado ocupe completamente todo el campo de moldeo y se pueda obtener el material con la geometría específica del dado al final del proceso de extrusión es importante garantizar que el material mantenga sus propiedades viscoelásticas durante todo su proceso de extrusión para evitar caídas de presión que puedan generar burbujas de aire en su interior o deformaciones en su geometría final. Para esto es importante mantener la temperatura del dado lo más uniforme posible en todo su volumen, sin embargo, debido a la baja conductividad térmica de los polímeros y el tiempo tan corto del recorrido del polímero por el dado hacen que el producto final no sea el esperado. Para este diseño se eligieron resistencias del tipo calentador de cartucho (cartridge heater) ya que, por el volumen tan grande del dado, su geometría y el espesor de sus paredes este sistema es mucho más eficiente con respecto a un sistema de resistencias de abrazadera. [26]

Para conocer la potencia necesaria de las resistencias se realizó el cálculo con respecto al peso del dado y el tiempo en que este se demoraría en alcanzar la temperatura final necesaria para mantener fluidizado el polímero. Tenemos:

$$\text{Potencia de la resistencia} = \frac{W * (Tf - T0) * Cp}{t}$$

**Ecuación 19** Potencia requerida para resistencias.

Donde:

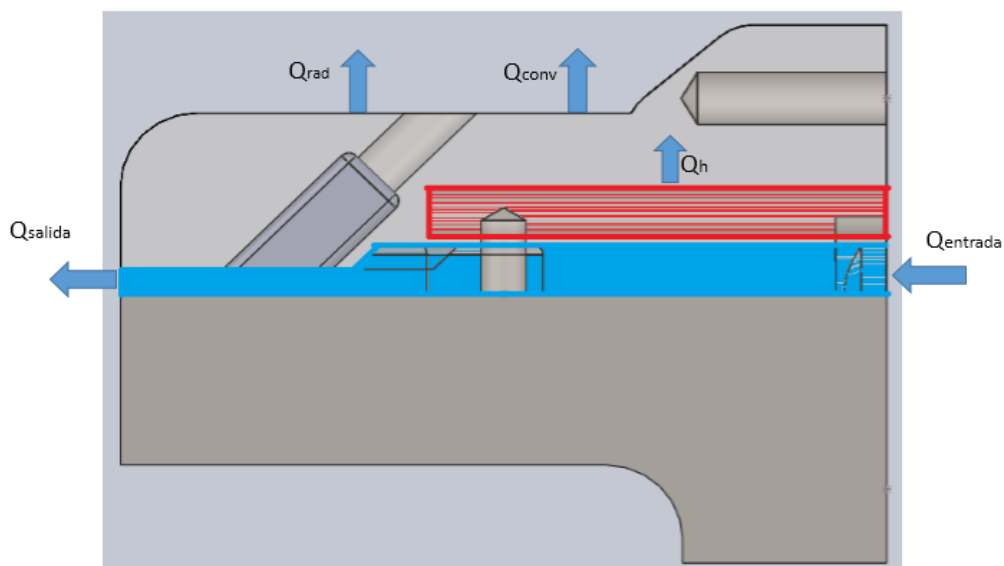
$m$	Peso del dado
$Tf$	Temperatura final
$T0$	Temperatura inicial
$Cp$	Capacidad térmica específica a presión constante
$\Delta t$	Lapso de Tiempo

Entonces la potencia necesaria para que el dado alcance esta temperatura será de:

$$P. Resistencia = \frac{15,6879 \text{ Kg} * (220^{\circ}\text{c} - 20^{\circ}\text{c}) * 475 \frac{\text{J}}{\text{Kg}}^{\circ}\text{c}}{2400 \text{ seg}} = 620,9825 \text{ watts}$$

Teniendo en cuenta que por diseño del dado se estableció que el sistema llevará 4 resistencias de cartucho ubicadas paralelamente a la dirección del desplazamiento del fluido, la potencia total necesaria es repartida en las 4 resistencias que se usarán en el sistema. Adicional a esto se decidió dejar el valor de las resistencias un poco por encima del valor necesario por si en algún momento se desea realizar pruebas con otro polímero distinto al LDPE el dado pueda aumentar o disminuir su temperatura según sea el caso; el control de las resistencias se realizará a través de los controladores digitales con los que cuenta la línea de extrusión y la temperatura será medida mediante el mismo sistema de termocuplas con la que cuenta la camisa de la extrusora.

**Figura 3-17** Vista de corte lateral superior dado extrusión.



Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

Cumpliendo con la primera ley de la termodinámica que dice que la suma de todas las energías que entran al sistema son igual a todas las energías que salen de este y teniendo en cuenta que el dado es un sistema que no almacena energía la ecuación de conservación de energía del dado quedaría establecida de la siguiente manera [26]:

$$Q_{me} + Q_h = Q_{ma} + Q_{rad} + Q_{ca}$$

**Ecuación 20** Conservación de la energía.

$Q_{me}$	Flujo de calor que ingresa al dado con la mezcla
$Q_h$	Flujo de calor suministrado por las resistencias
$Q_{ma}$	Flujo de calor saliendo del dado con la mezcla
$Q_{rad}$	Energía perdida por el dado debido a radiación con el ambiente
$Q_{ca}$	Flujo de calor por convección de aire
$\dot{m}$	flujo másico de la mezcla
$T_e$	Temperatura de entrada del dado
$T_s$	Temperatura de salida del dado
$\varepsilon$	Emisividad de material
$\sigma$	Constante de Steffan - Boltzman
$T_{sup}$	Temperatura superficial del dado
$T_\infty$	Temperatura del Ambiente
$h$	coeficiente de convección

El cambio de energía interna que sufre el polímero por la transferencia de calor que ocurre durante el proceso de extrusión está expresada por:

$$Q_{me} - Q_{ma} = \dot{m} * C_p(T_e - T_s)$$

**Ecuación 21** Cambio de energía interna.

La pérdida de calor que se pierde por radiación hacia la atmósfera está dada por la ecuación:

$$Q_{rad} = \varepsilon * \sigma * A(T_s^4 - T_\infty^4)$$

**Ecuación 22** Pérdida de calor.

Donde A es el área de la superficie que emite la radiación. La pérdida de calor por convección entre la superficie del dado y el polímero se puede calcular bajo la siguiente ecuación:

$$Q_{rad} = Ah(T_s - T_\infty)$$

**Ecuación 23** Pérdida de calor por convección.

## 3.7 Cálculos de laminación.

A partir de los ensayos de laboratorio en el taller de plásticos mencionados en el capítulo II, se determina los criterios con los cuales se establece un coeficiente de resistencia “K” hipotético de 5 MPa y el exponente de endurecimiento por deformación “n” de 0,15.

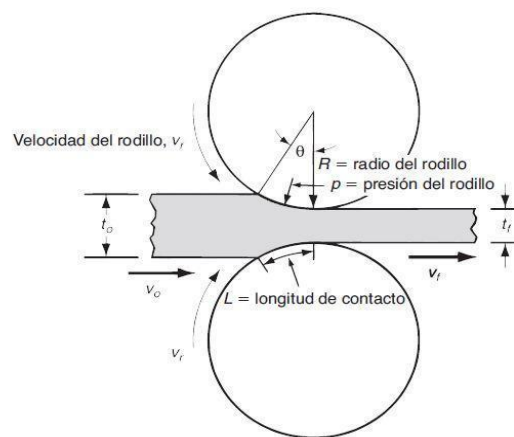
### 3.7.2 Cálculo de las fuerzas de compresión y potencia de laminación.

Para determinar los datos mencionados se tomará la teoría de laminado plano de materiales ferrosos:

Datos de proceso:

- Ancho del material a laminar  $w$  (mm): 150
- Espesor inicial del material  $t_0$  (mm): 10
- Espesor final de material  $t_f$  (mm): 8
- Velocidad de rodillo  $N$  (rpm): 0,5
- Coeficiente de fricción  $\mu$ : 0,4
- Radio del rodillo  $R$  (mm): 51

**Figura 3-18:** Laminado [27].



Nombre de la fuente: M. P. Groover, *fundamentos de manufactura moderna*, 3rd ed. México D.F., 2007.

El draft que se intenta en esta operación de laminado es:

$$d = t_0 - t_f = 2 \text{ mm}$$

**Ecuación 24** Draft.

A partir de la ecuación draft máxima, el draft máximo posible para el coeficiente de fricción dado es:

$$d_{max} = (\mu)^2 (R) = 4,08 \text{ mm}$$

**Ecuación 25** Draft máximo.

Con la reducción máxima se determina que la reducción estimada es posible. A partir de este valor procedemos a obtener la longitud de contacto para el cálculo de fuerza de laminación. Para dicho proceso la longitud de contacto será:

$$L = \sqrt{R (t_0 - t_f)} = 7,141428 \text{ mm}$$

**Ecuación 26** Longitud de contacto.

A continuación, determinamos la deformación real:

$$\varepsilon = \ln \frac{t_0}{t_f} = 0,22314$$

**Ecuación 27** Deformación real.

Ya determinada la deformación real, se procede a obtener el esfuerzo de fluencia promedio:

$$\underline{Y_f} = \frac{K (\varepsilon)^n}{1 + n} = 3,4718409 \text{ MPa}$$

**Ecuación 28** Esfuerzo de fluencia.

Con el esfuerzo de fluencia promedio  $\underline{Y_f}$  y la longitud de contacto se procede a determinar la fuerza de laminación:

$$F = \underline{Y_f} (w) (L) = 3719,085 \text{ N}$$

**Ecuación 29** Fuerza de laminación.

A partir del valor obtenido se determina el momento de torsión requerido para cada eje de laminación con base en la ecuación 23.

$$T = 0,5 (F) (L) = 13,27979 \text{ Nm}$$

**Ecuación 30** Torque.

Y la potencia mínima necesaria para cada eje de laminación se obtiene de la ecuación 25.

$$P = \frac{2\pi (N) (F) (L)}{60} = 1,3906 W$$

**Ecuación 30** Potencia requerida.

## 4 Capítulo 4

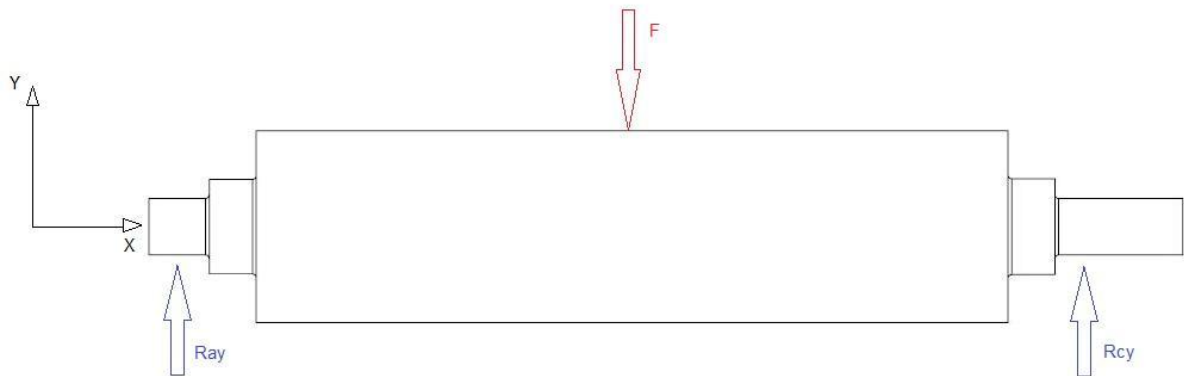
### 4.2 Diseño detallado.

#### 4.2.2 Diseño eje de laminación.

Con base a los datos obtenidos en las condiciones iniciales de laminación, se procederá a diseñar el eje de laminación.

Las fuerzas que actúan sobre el rodillo se presentan en la figura 4-1:

**Figura 4-1** Esquema de fuerzas actuantes en el eje de laminación.



Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

La fuerza máxima de compresión para el proceso es  $F = 3719,08 \text{ N}$

Las reacciones de los extremos  $R_{ay}$  y  $R_{cy}$ .

$$R_{ay} = 1859,5427 \text{ N} \quad ; \quad R_{cy} = 1859,5427 \text{ N}$$



El material del eje de laminación es un acero SAE 4140, sus propiedades son (Tabla 4.1):

**Tabla 4-1** Propiedades mecánicas acero SAE 4140.

Símbolo	Valor	Nombre
$\sigma_B$	972 N/mm <sup>2</sup>	Esfuerzo máximo
$\sigma_F$	657 N/mm <sup>2</sup>	Esfuerzo de fluencia
$\sigma_{alt}$	700 N/mm <sup>2</sup>	Esfuerzo alternante

Nombre de la fuente: Bases de datos de ANSYS.

Además, para el cálculo a la fatiga es necesario determinar las condiciones iniciales de diseño (Tabla 4-2).

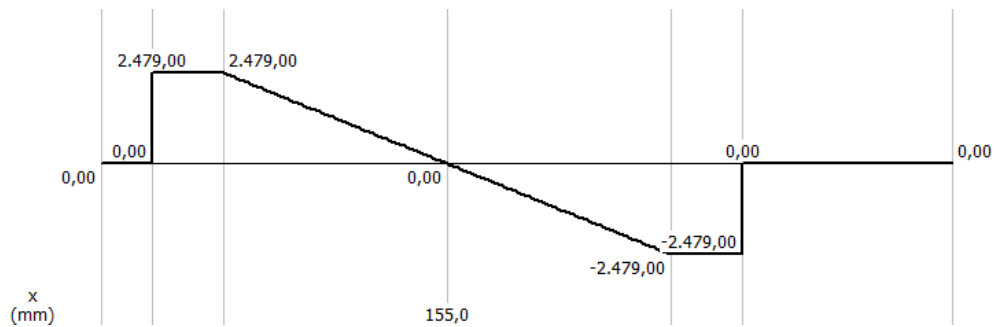
**Tabla 4-2** Condiciones de diseño.

Símbolo	Valor	Nombre
$R_t$	0,4	Acabado superficial
$T_t$	100 °C	Temperatura de trabajo
$C_{of}$	50 %	Confiabilidad

Nombre de la fuente: tabla de los autores.

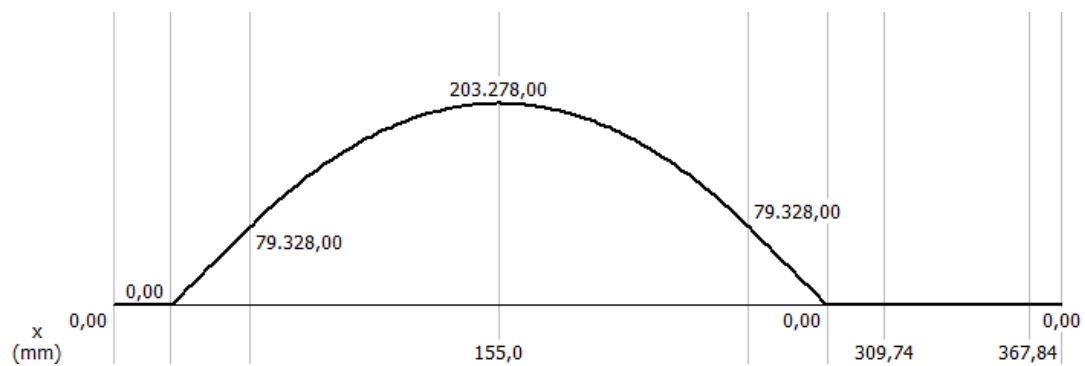
Diagrama de la fuerza cortante, momento flector y momento torsor en el plano XY, según las fuerzas actuantes en la figura 4-1.

**Figura 4-2** Diagrama de fuerza cortante (N).



Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

**Figura 4-3** Diagrama de momento flector (Nmm).



Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

A continuación, se detallará el procedimiento para calcular los factores de seguridad de la sección A, por ser la más crítica, ver figura xxxx, para las demás secciones solo se tabulará sus valores, ya que el procedimiento es similar.

### **Análisis de la sección B**

Momento flector:       $M_f = 149693,19 \text{ Nmm}$

Momento torsor:       $M_t = 20454,97 \text{ Nmm}$

El escalón en el punto B presenta las variables  $D = 51 \text{ mm}$ ,  $d = 25,5 \text{ mm}$  y  $r = 1 \text{ mm}$ .

El esfuerzo de flexión es alternante puro, por lo cual:

$$\sigma_{tm} = \frac{32 (M)}{\pi (D/2)^3} = 91,9543 \text{ N/mm}^2$$

**Ecuación 31** Esfuerzo de flexión.

El esfuerzo de torsión tiene carácter estático, entonces:

$$T_{tm} = \frac{16 (T)}{\pi (D/2)^3} = 4,0787 \text{ N/mm}^2$$

**Ecuación 32** Esfuerzo de torsión.

En la tabla 4-3 extraída del anexo de cálculo, se muestran los valores que afectan el diseño a la fatiga para las condiciones geométricas y físicas del rodillo.

**Tabla 4-3.** Factores que afectan la resistencia a la fatiga.

Símbolo	Valor	Nombre
$C_s$	0,7285	Coeficiente de superficie
$C_t$	0,8768	Coeficiente de tamaño
$C_{temp}$	1	Coeficiente de temperatura
$C_{carga}$	1	Coeficiente de carga
$C_c$	1	Coeficiente de confiabilidad
$K_f$	2,2945	Factor de concentración para flexión

**Tabla 4-3.** (Continuación).

Símbolo	Valor	Nombre
$K_t$	1,8743	Factor de concentración para la torsión
$\sqrt{a}$	0,0358	Constante de Neuber para aceros

Nombre de la fuente: Tabla de los autores.

La sensibilidad a la muesca  $\eta$  se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{r}}} = 0,9654$$

**Ecuación 33** Sensibilidad a la muesca.

El factor efectivo de concentración de esfuerzo para la flexión y torsión es:

$$\beta_f = 1 + \eta (2,2945 - 1) = 2,2498$$

**Ecuación 34** Factor efectivo de concentración a flexión.

$$\beta_t = 1 + \eta (1,8743 - 1) = 1,8399$$

**Ecuación 35** Factor efectivo de concentración a torsión.

El esfuerzo equivalente estático para la flexión  $\sigma_{fm} = 0 \text{ N/mm}^2$  y para la torsión:

$$T_{tm} = 4,0787 \text{ N/mm}^2$$

A partir de estos valores se determina el esfuerzo equivalente según Von Mises, el cual es:

$$\sigma_{meq} = \sqrt{(0)^2 + 3(4,0787)^2} = 323,8613 \text{ N/mm}^2$$

**Ecuación 36** Esfuerzo equivalente Von Mises.

Ahora el análisis por efecto de la fatiga, el esfuerzo equivalente será:

$$\sigma_{fa} = \left( \frac{\beta_f}{C_c * C_t * C_{temp} * C_{carga} * C_s} \right) \sigma_{fa} = 323,8613 \text{ N/mm}^2$$

**Ecuación 37** Esfuerzo a fatiga.

Para la torsión no existe esfuerzo de torsión alternante, por lo tanto:

$$T_{ta} = 0 \text{ N/mm}^2$$

$$T_{ta1} = \left( \frac{\beta_t}{C_c * C_t * C_{temp} * C_{carga} * C_s} \right) T_{ta} = 0 \text{ N/mm}^2$$

**Ecuación 38** Esfuerzo de torsión alternante.

El esfuerzo equivalente según Von Mises se expresa como:

$$\sigma_{aeq1} = \sqrt{\sigma_{fa1}^2 + 3T_{fa1}^2} = 323,8613 \text{ N/mm}^2$$

**Ecuación 39** Esfuerzo equivalente.

Factor de seguridad a la fatiga

$$FS = \left( \frac{\sigma_{meq}}{\sigma_B} + \frac{\sigma_{aeq1}}{\sigma_{alt}} \right)^{-1} = 2,1686 \text{ N/mm}^2$$

**Ecuación 40** Factor de seguridad a la fatiga.

Esfuerzo equivalente superior es

$$\sigma_{seq} = \sqrt{\sigma_{fa}^2 + 3T_{tm}} = 92,0208 \text{ N/mm}^2$$

**Ecuación 41** Esfuerzo equivalente superior.

Finalmente, el factor de seguridad a la fluencia es

$$FS = \frac{\sigma_F}{\sigma_{seq}} = 7,1396$$

**Ecuación 42** Factor de seguridad a la fluencia.

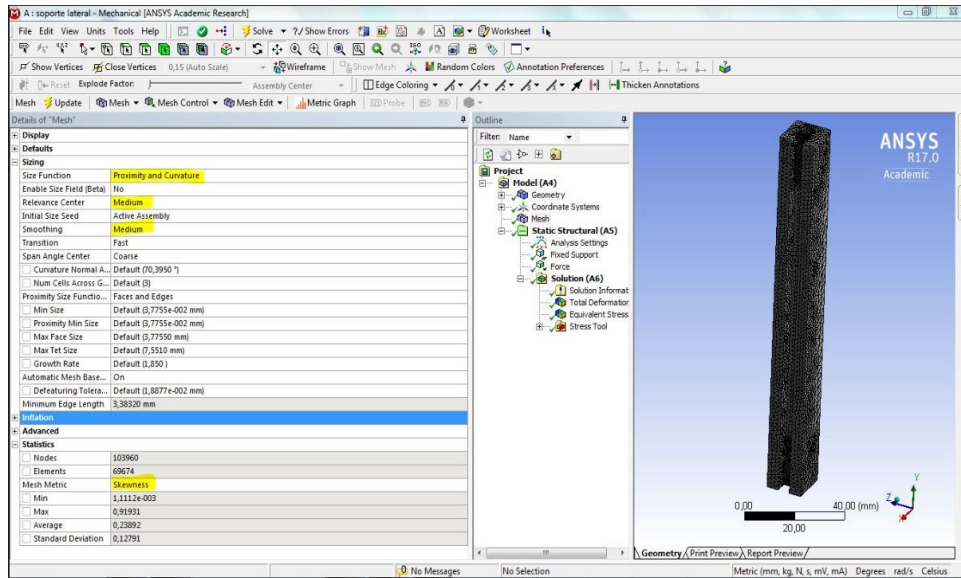
## **4.3 Elementos finitos.**

### **4.3.2 Diseño por elementos finitos.**

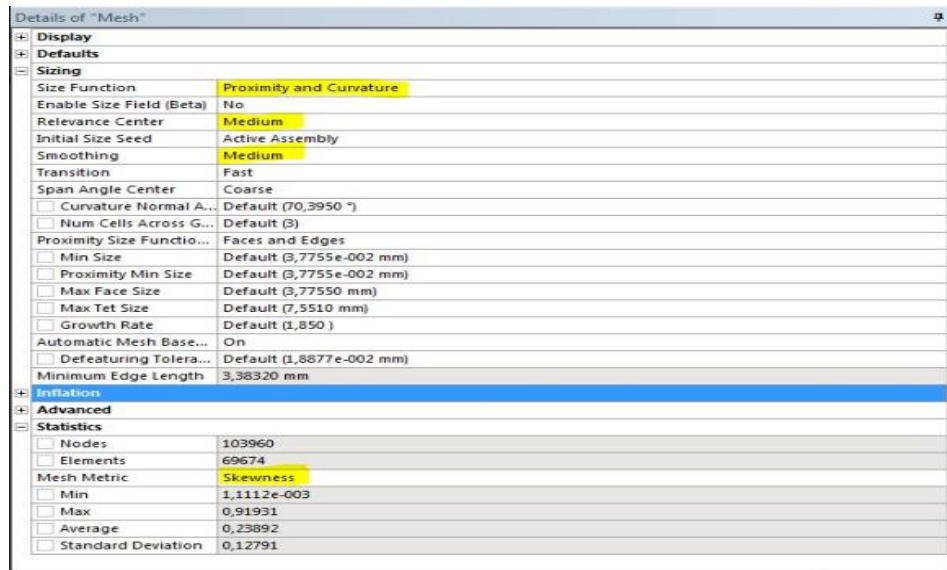
El método de elementos finitos (MEF) es un método numérico usado en el diseño de máquinas para el análisis mecánico de elementos complejos mediante el modelamiento de estructuras analizando cada pieza como una serie de elementos finitos y basando sus fundamentos en el análisis de redes estructural. Teniendo en cuenta la importancia del análisis dinámico y estático en el diseño mecánico y la complejidad matemática que surge por el tipo de geometría y las cargas aplicadas, el obtener resultados exactos con ecuaciones tan extensas y complejas es algo demasiado intrincado; es por esto que se decide trabajar con este método [34].

Para la simulación de los diseños usamos como software ANSYS, una herramienta bastante completa con un buen reconocimiento en el área de ingeniería y con una gran variedad de opciones para trabajar. Los resultados que se obtengan a través de la simulación por el software están directamente comprometidos con el correcto ingreso de la información por parte del usuario; para las simulaciones de cada elemento diseñado se señalaron todas las fuerzas actuantes sobre cada pieza y se parametrizo el tamaño de malla respecto a cuál de las opciones presentadas brindaba la mejor calidad de enmallado como se puede observar en la Figura 4-4.

Figura 4-4 a) pantalla general de ANSYS 17 WORKBENCH con especificaciones del diseño. b) detalles del enmallado en ANSYS 17 WORKBENCH.



a)



Nombre de la fuente: Imagen de los autores.



El tipo de malla o “size function” permite escoger la mejor opción de enmallado que se puede aplicar a nuestro diseño, el tipo de malla por proximidad y curvatura es la opción que se escogió teniendo en cuenta que esta malla modifica la geometría de la celda respecto a la geometría de la pieza; la cantidad de elementos que se generan permite garantizar que se realiza un análisis bastante detallado sobre todo en las áreas donde la geometría cambia o donde se puede creer que es un espacio crítico del diseño. La malla seleccionada al ser aplicada al elemento puede ser evaluada teniendo en cuenta la tabla de calidad de malla la cual usando como unidad de medida la simetría de la celda o “skewness” determina que tan simétrico es el enmallado; tomamos como parámetro que la pieza ha superado la simulación cuando más del 90 % de sus elementos esté en calidad “buena” (good) o mejor ( $<0.5$ ).

**Tabla 4-4** calidad de enmallado.

Skewness	Cell Quality
1	degenerate
0.9- $<1$	bad (sliver)
0.75-0.9	poor
0.5-0.75	fair
0.25-0.5	good
$>0-0.25$	excellent
0	equilateral

Nombre de la fuente: Tabla del banco de datos de ANSYS.

#### 4.3.2.1 Barra de soportes laterales

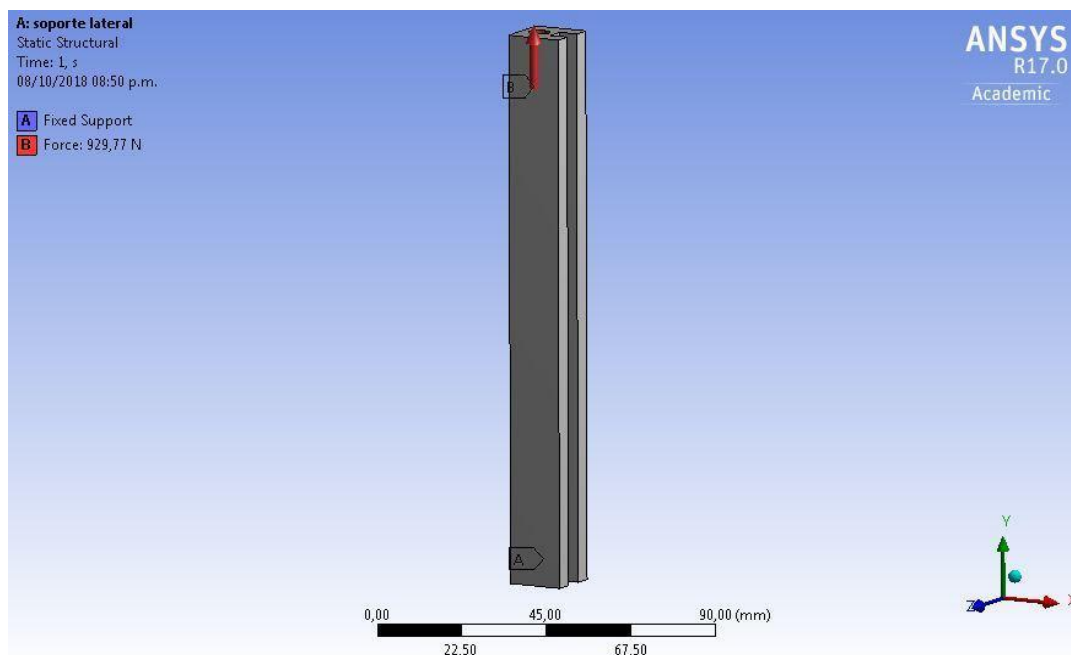
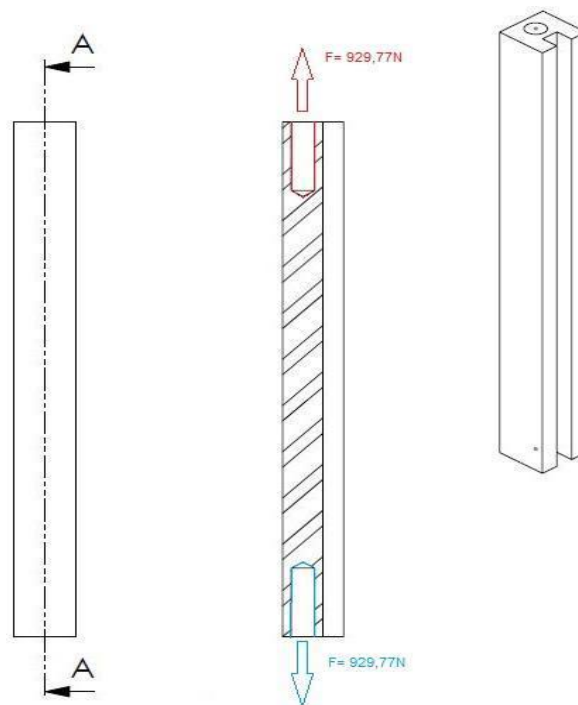
Las barras de soporte lateral recibirán todas las cargas que soportan los rodillos de laminación, mediante el proceso de selección de material y teniendo en cuenta las dimensiones y las fuerzas que actúan sobre este se escogió el acero SAE 1045 como el material de fabricación, sus propiedades principales son:

**Tabla 4-5** Propiedades del material.

Material	Acero SAE 1045
Densidad	7900 kg/m <sup>3</sup>
Límite elástico	351.57 N/mm <sup>2</sup>
Coefficiente de poisson	0.29 N/D
Esfuerzo último	420.51 N/mm <sup>2</sup>

Nombre de la fuente: Tabla de bases de datos de ANSYS.

Figura 4-5 Esquemas de fuerzas actuantes.



Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

La flecha roja representa la carga aplicada mientras que la flecha azul representa la fuerza que ejerce el sistema como restricción de movimiento. Las propiedades físicas de la pieza y el tamaño de malla usado se muestran a continuación:

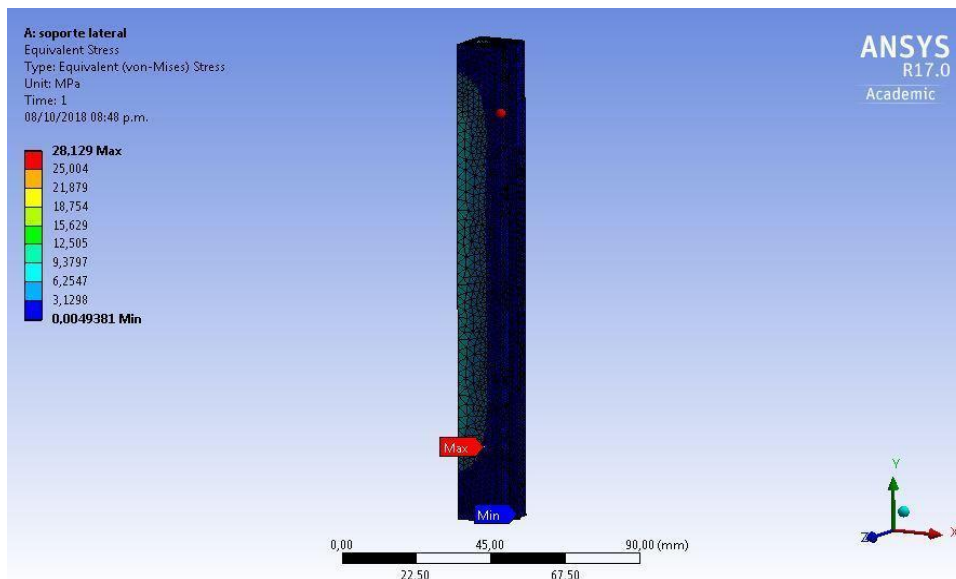
**Tabla 4-6** Propiedades físicas y tamaño del mallado.

PROPIEDADES	
Masa	28713 mm <sup>3</sup>
Volumen	0.22597 kg
MALLA	
Elementos	69674
Nodos	103960

Nombre de la fuente: Tabla de los autores.

Los resultados obtenidos para la distribución de esfuerzos en la pieza:

**Figura 4-6** Esfuerzos equivalentes de Von Mises.



Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

El factor de seguridad con el que la pieza cuenta es:

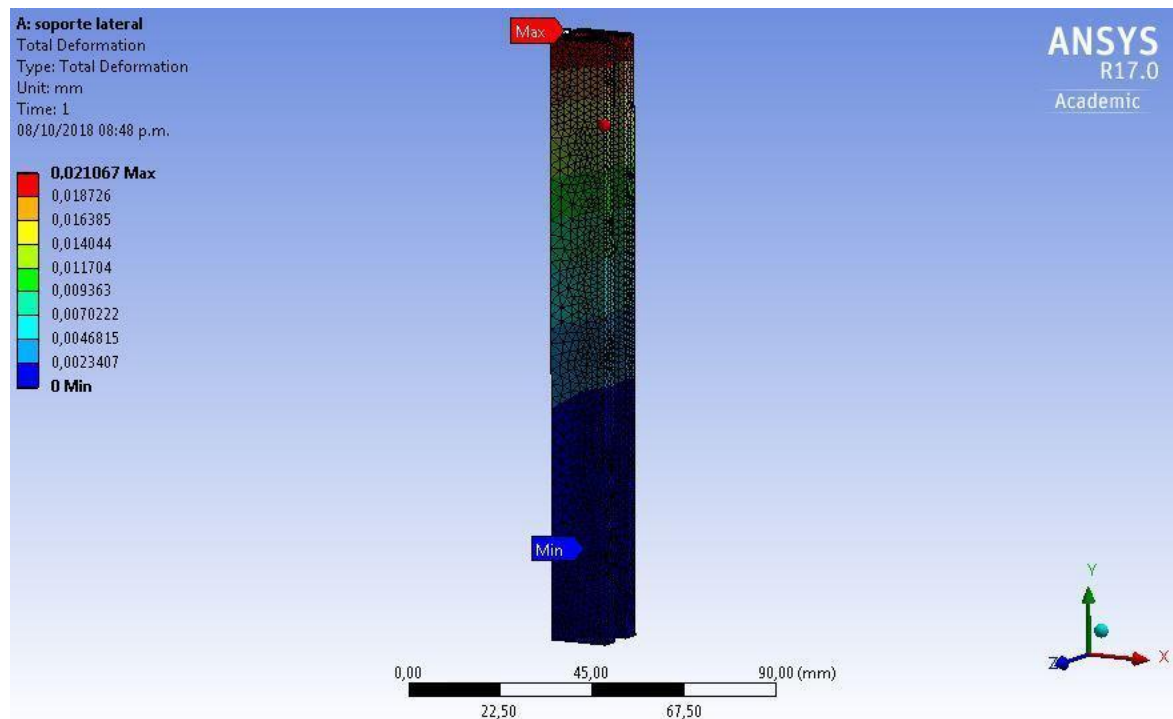
$$FS = \frac{530MPa}{50,204 MPa}$$

**Ecuación 43** Factor de seguridad.

El factor de seguridad es de 10.55 y cumple con lo establecido en los parámetros de diseño iniciales y es notablemente muy superior al valor establecido, Sin embargo, aunque el valor es significativamente alto se decide trabajar con esta pieza pensando en suplir otras necesidades que pueden favorecer notablemente el ensamble y funcionamiento de la pieza.

La deformación que sufre el elemento es:

**Figura 4-7** Deformación total.

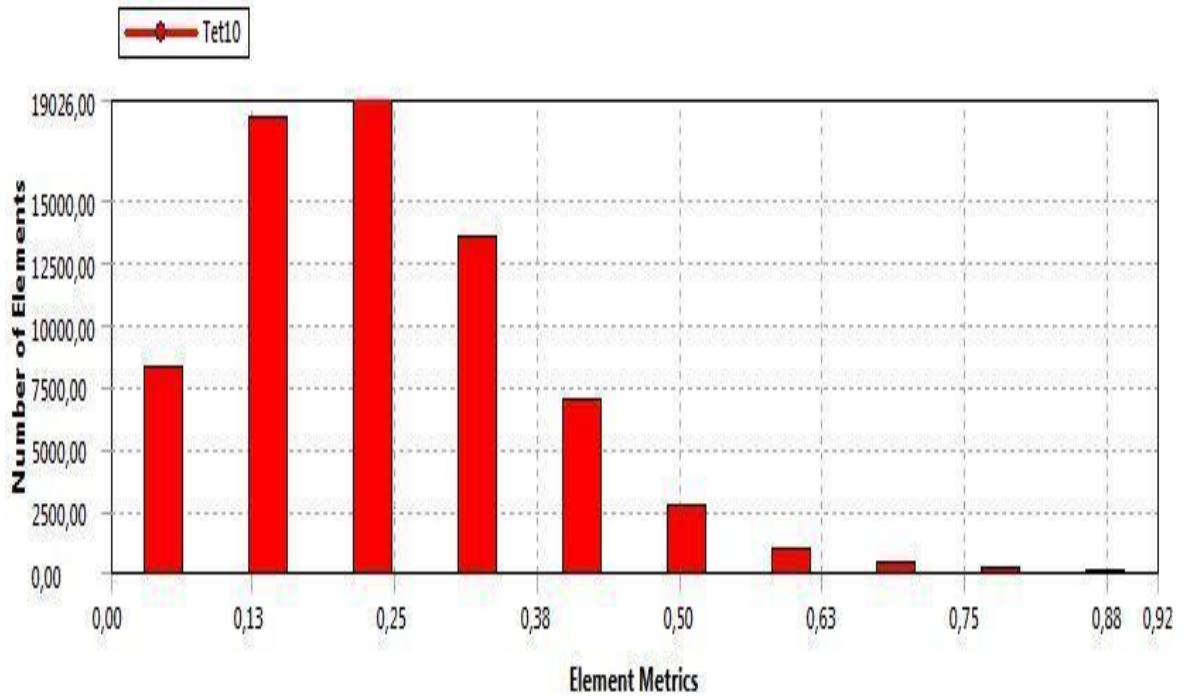


Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

La máxima deformación obtenida es de:

$$\sigma_{max} = 0,021067 \text{ mm}$$

**Figura 4-8** Calidad de la malla empleada.

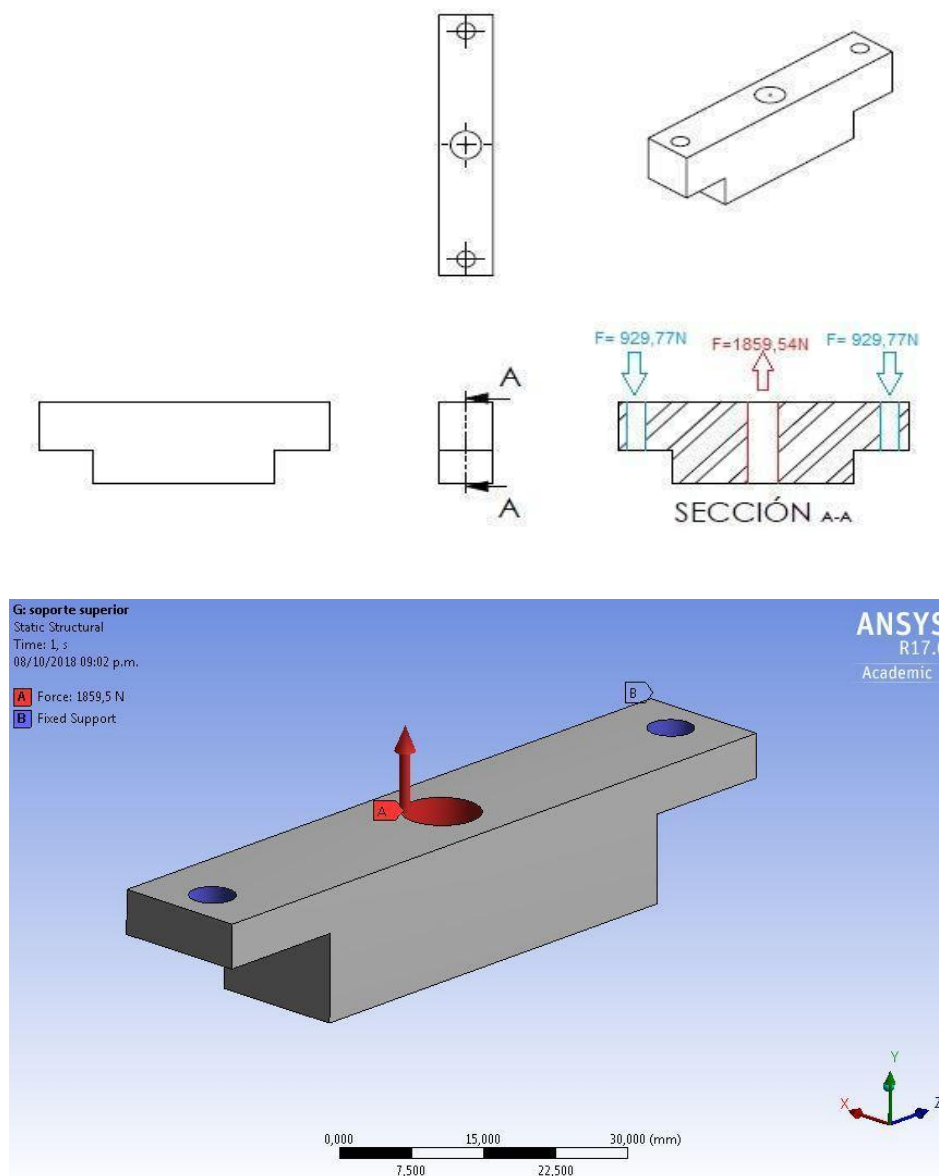


Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

#### 4.3.2.2 Base de soporte superior

La base superior de la estructura de soporte de los rodillos de laminación se encuentra en la figura de la 1 como pieza 22 del ensamble, las fuerzas actuantes están ubicadas sobre los puntos de sujeción que en este caso se realizó con tornillería. Esta pieza se fabricó en acero SAE 1045 por sus propiedades (Tabla 4-7).

**Figura 4-9** Esquemas de fuerzas actuantes.



Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

Para realizar el análisis por elementos finitos se tuvo en cuenta las siguientes características de la pieza:

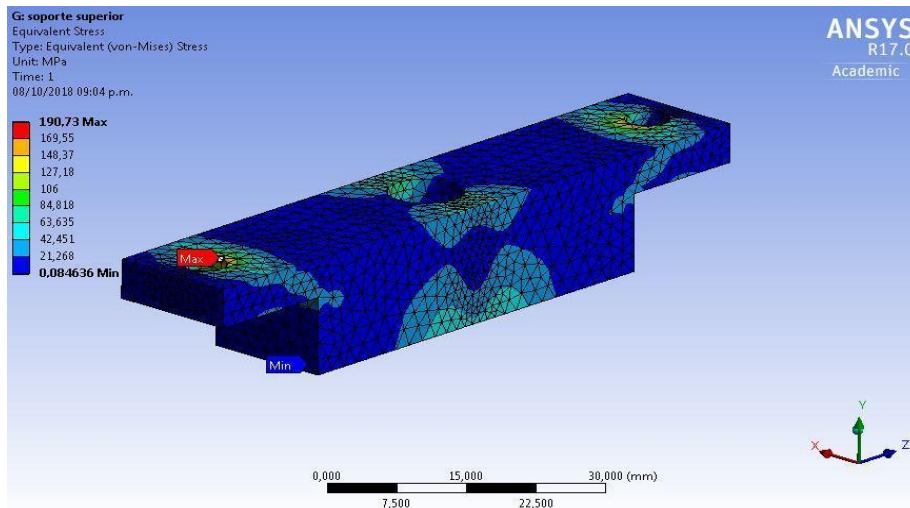
**Tabla 4-7** Propiedades físicas y tamaño del mallado.

Propiedades	
Masa	0,26395 kg
Volumen	33625 m <sup>3</sup>
Malla	
Elementos	56253
Nodos	85034

Nombre de la fuente: Tabla de los autores.

Los resultados obtenidos luego de realizar la simulación en ANSYS 17 WORKBENCH para la distribución de esfuerzos son:

**Figura 4-10** Esfuerzos equivalentes de Von Mises.



Nombre de la fuente: Imagen de los autores.



El factor de seguridad es:

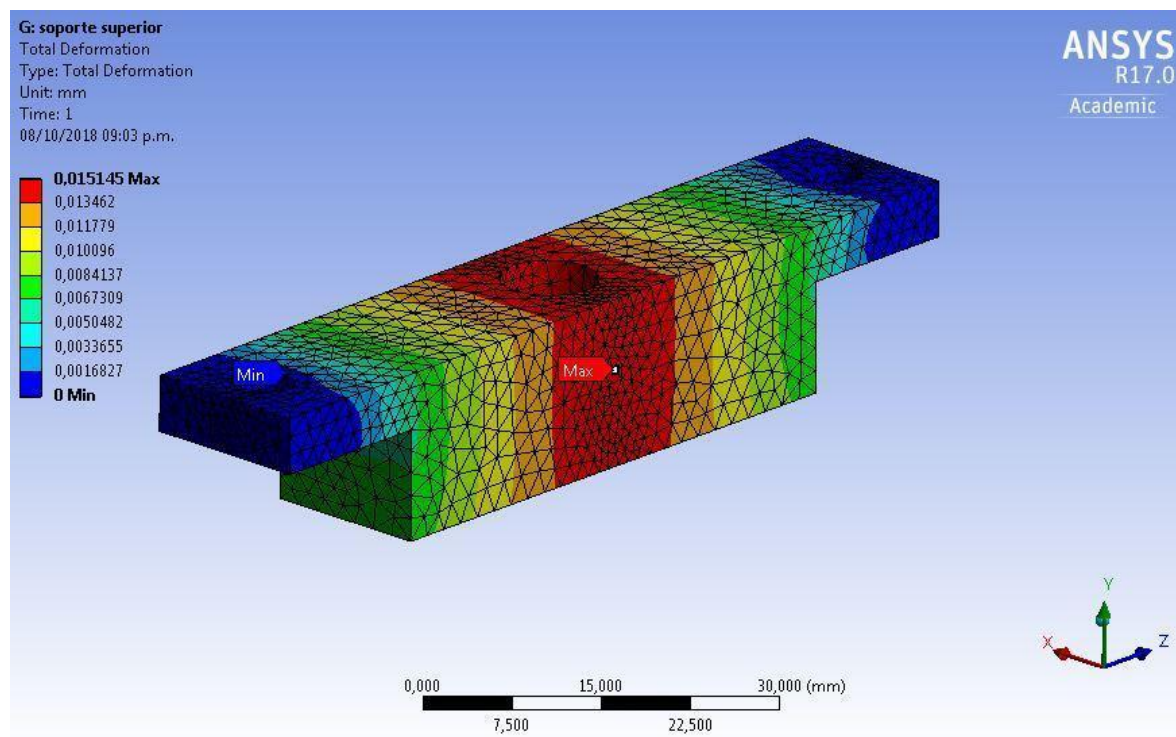
$$FS = \frac{530 \text{ MPa}}{51,175 \text{ MPa}}$$

**Ecuación 44** Factor de seguridad.

Como se puede observar el factor de seguridad de la pieza es de 10.35, el valor es bastante alto teniendo en cuenta los parámetros establecidos en la metodología trabajada, sin embargo, no se buscó una reducción de tamaño por la necesidad de cumplir con otros requisitos necesarios para el sistema como los son la facilidad de ensamble y la adaptación a la línea de extrusión existente.

La deformación total que sufre la pieza es:

**Figura 4-11** Deformación total.

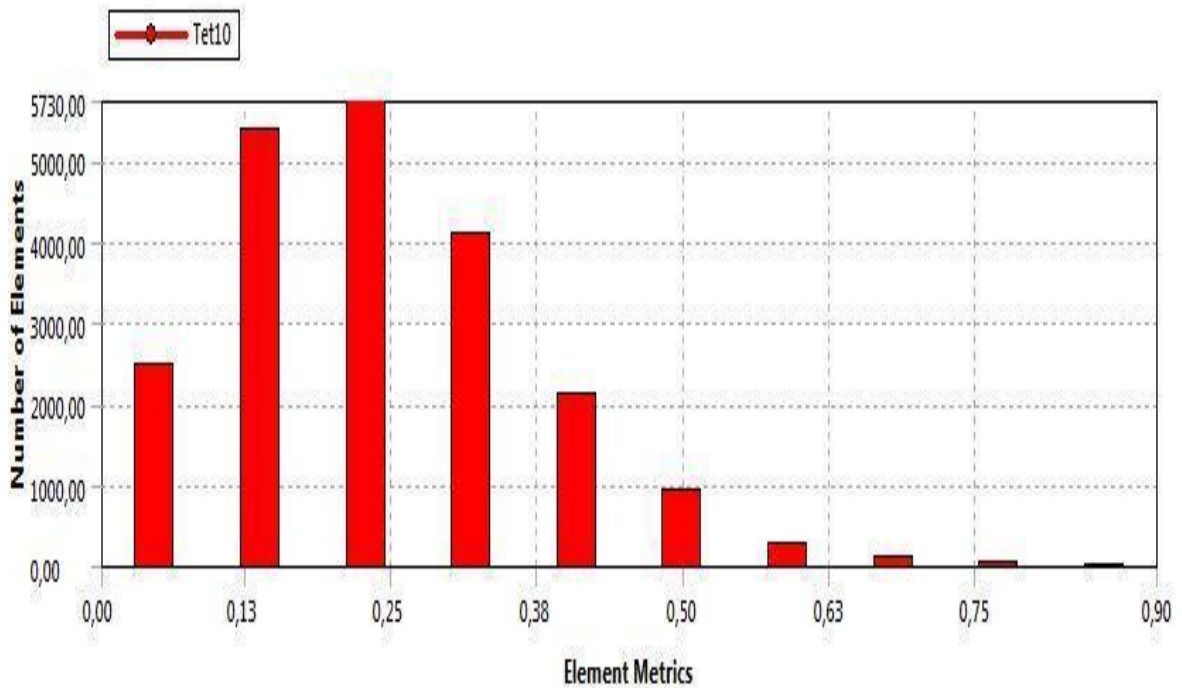


Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

Teniendo como máxima deformación:

$$\sigma_{max} = 0,0034885 \text{ mm}$$

**Figura 4-12** Calidad de la malla empleada.

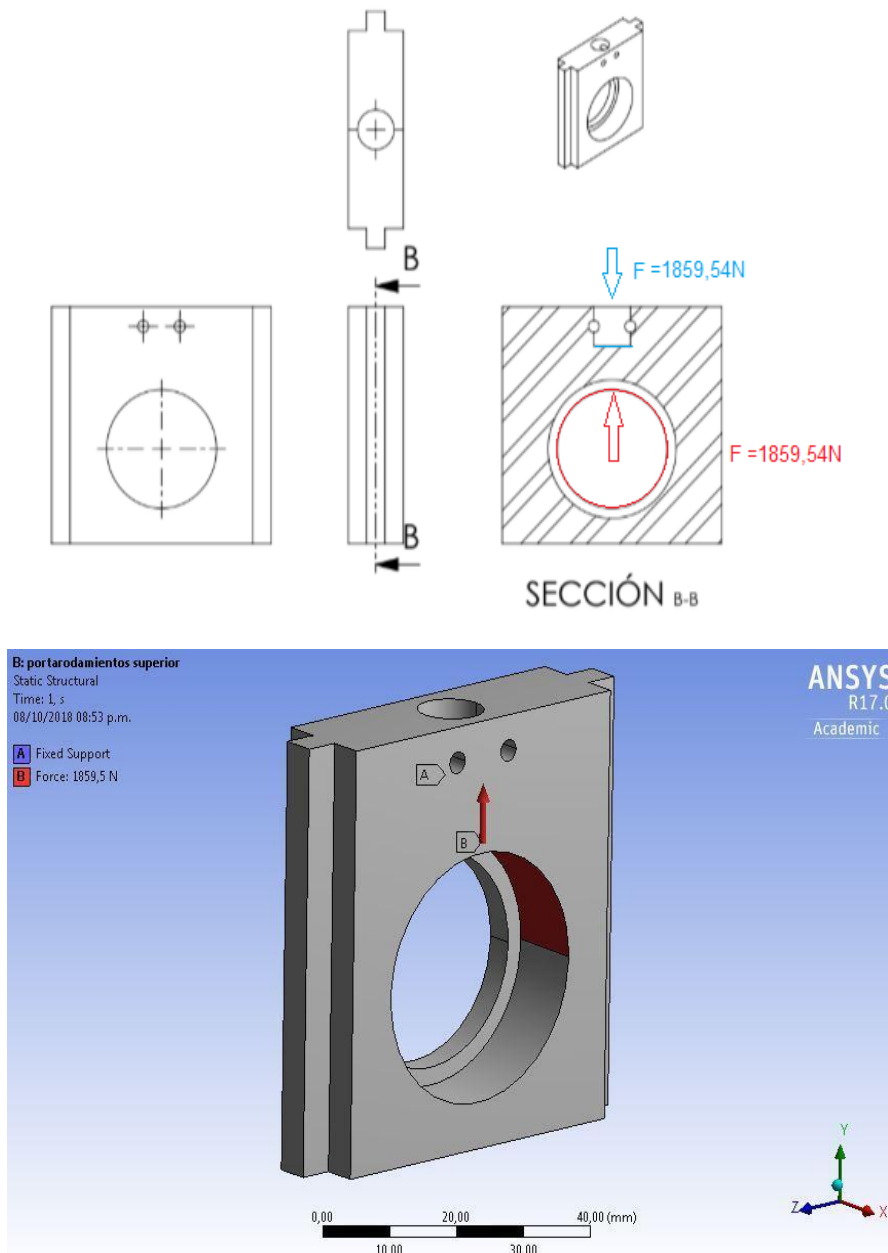


Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

#### 4.3.2.3 Porta rodamiento superior de rodillo

El porta rodamiento superior del rodillo de laminación cuenta con una característica puntual ya que es la pieza que permite el desplazamiento vertical del rodillo superior. La pieza recibe una fuerza específica en el punto de sujeción del tornillo de desplazamiento, así como recibe la fuerza que genera la masa del rodillo.

Figura 4-13 Esquemas de fuerzas actuantes.



Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

El diseño fue analizado por elementos finitos y también se fabricó en acero SAE 1045 (Tabla 4-7).

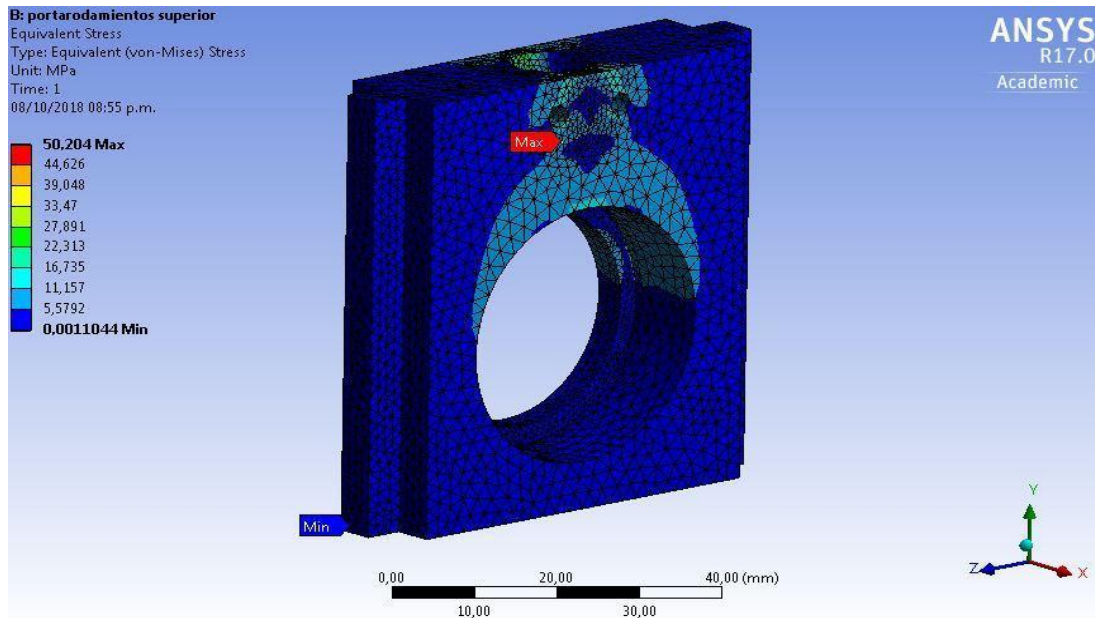
**Tabla 4-8** Propiedades físicas y tamaño del mallado.

Propiedades	
Masa	0,26395 Kg
Volumen	33625 m <sup>3</sup>
Malla	
Elementos	56253
Nodos	85034

Nombre de la fuente: Tabla de los autores.

La distribución de esfuerzos en el elemento se muestra a continuación:

**Figura 4-14** Esfuerzos equivalentes de von Mises.



Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

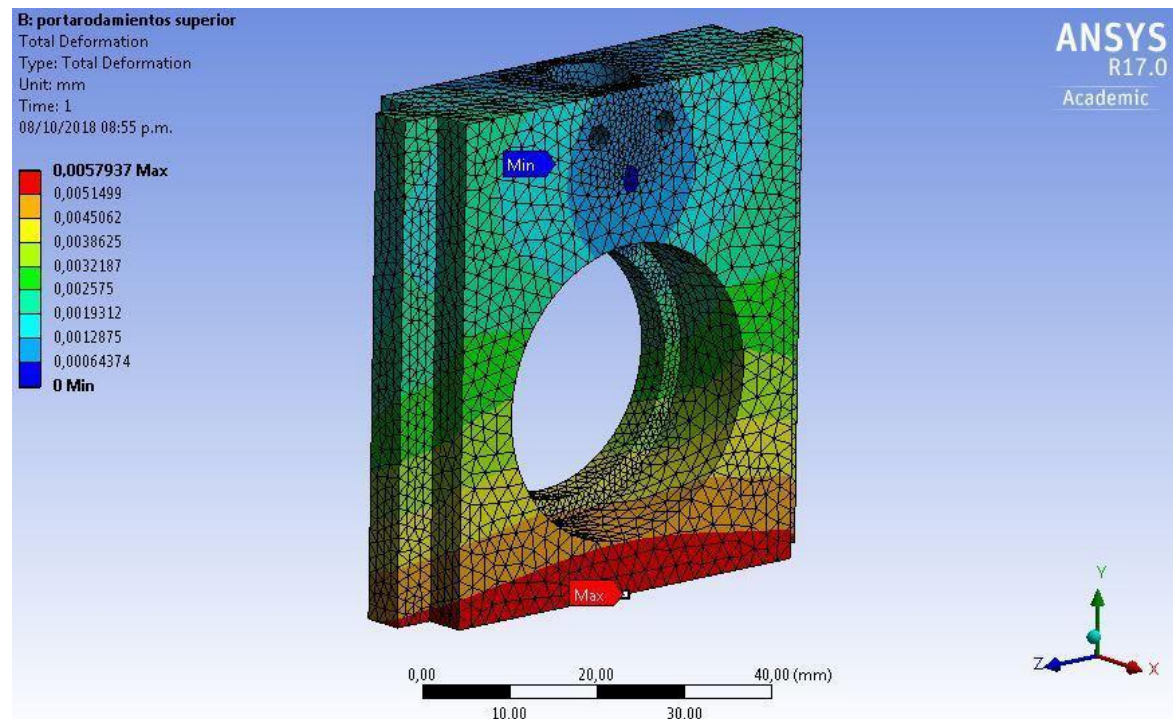
Teniendo en cuenta el valor máximo de esfuerzos el factor de seguridad es de:

$$FS = \frac{530 \text{ MPa}}{50,204 \text{ MPa}}$$

**Ecuación 45** Factor de seguridad.

El factor de seguridad de la pieza es de 10.55; teniendo en cuenta los parámetros iniciales de diseño la pieza cumple satisfactoriamente. La deformación que sufre la pieza con las cargas es de:

**Figura 4-15** Deformación total.

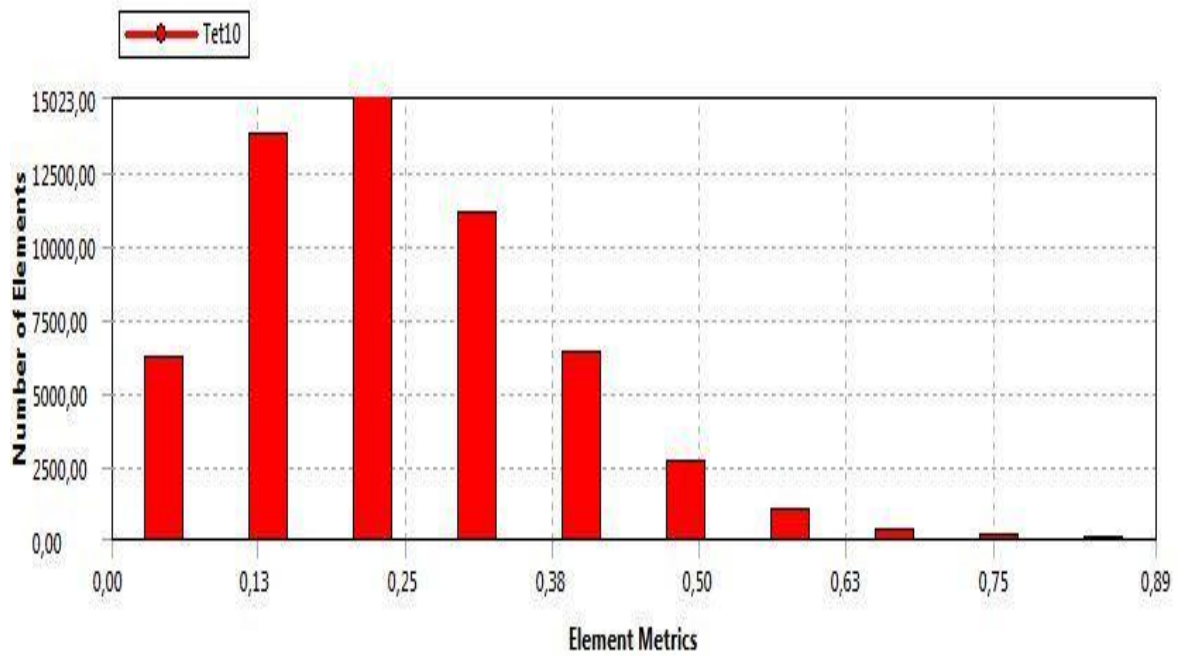


Nombre de la fuente: Imagen propia.

La deformación máxima es de:

$$\sigma_{max} = 0,0057937 \text{ mm}$$

**Figura 4-16** Calidad de la malla empleada.

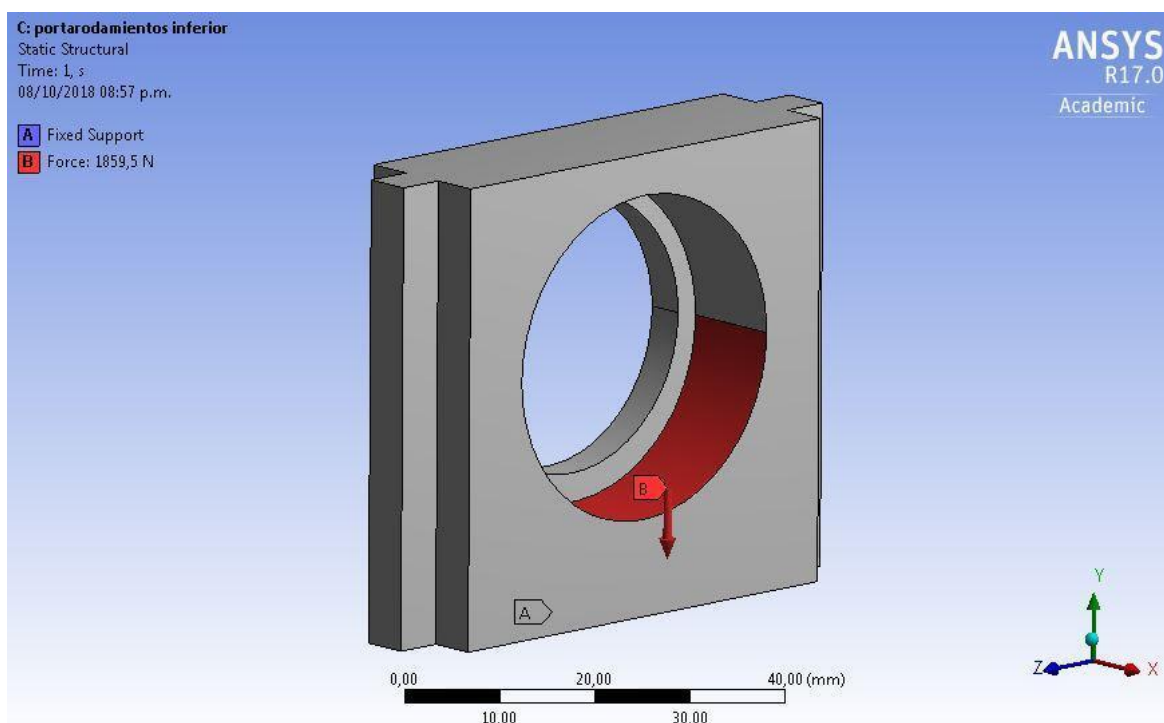
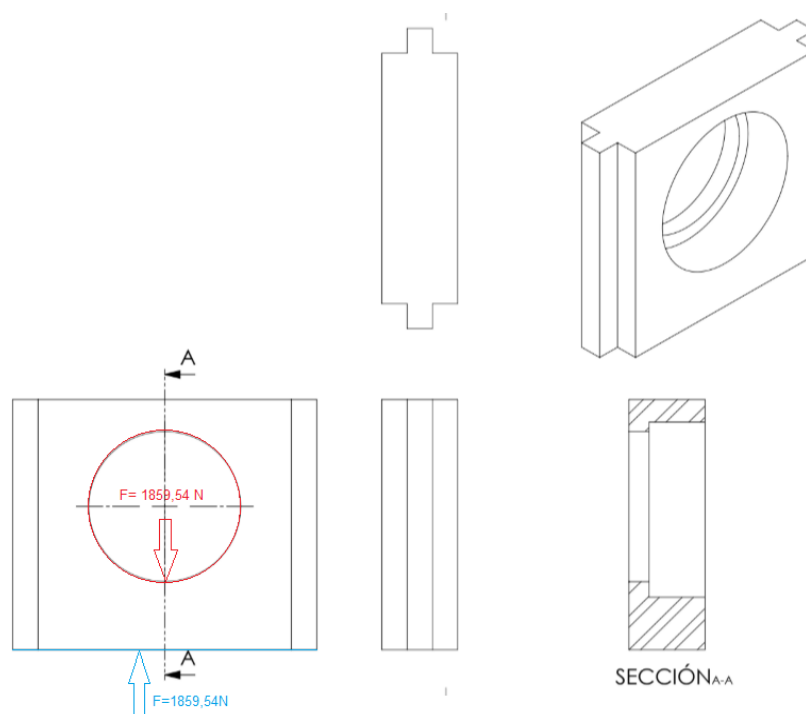


Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

#### 4.3.2.4 Porta rodamiento inferior de rodillo.

El porta rodamiento inferior a diferencia del superior se encuentra fijo.

Figura 4-17 Esquemas de fuerzas actuantes.





Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

El diseño fue analizado por elementos finitos y se fabricó en acero SAE 1045 (Tabla 4-7).

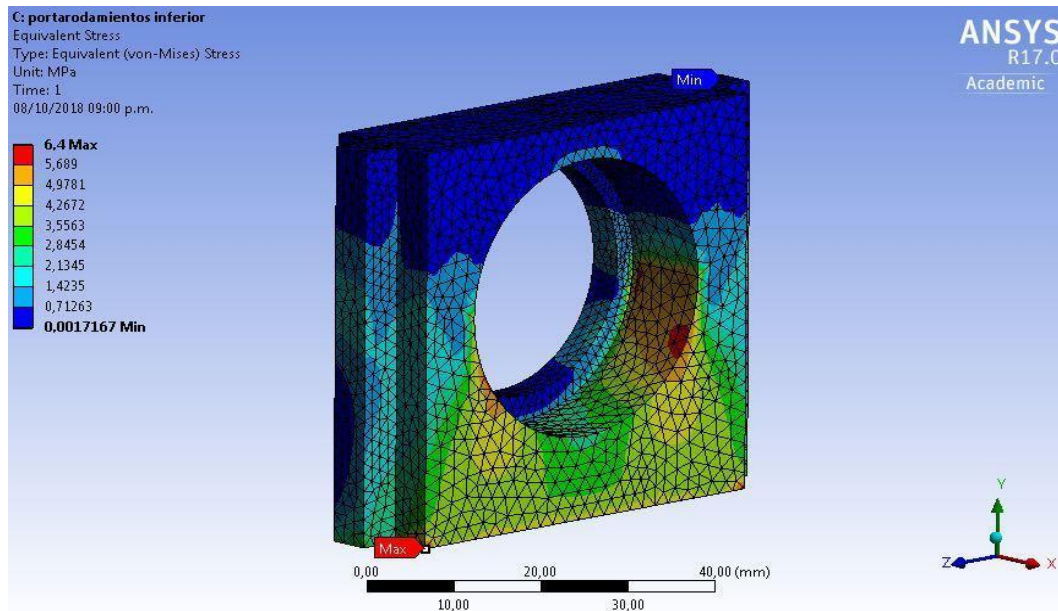
**Tabla 4-9** Propiedades físicas y tamaño del mallado.

Propiedades	
Masa	0,020873 kg
Volumen	26590 m3
Malla	
Elementos	43692
Nodos	66054

Nombre de la fuente: Tabla de los autores.

La distribución de esfuerzos en el elemento se muestra a continuación:

**Figura 4-18** Esfuerzos equivalentes de von Mises.



Nombre de la fuente: Imagen de los autores.



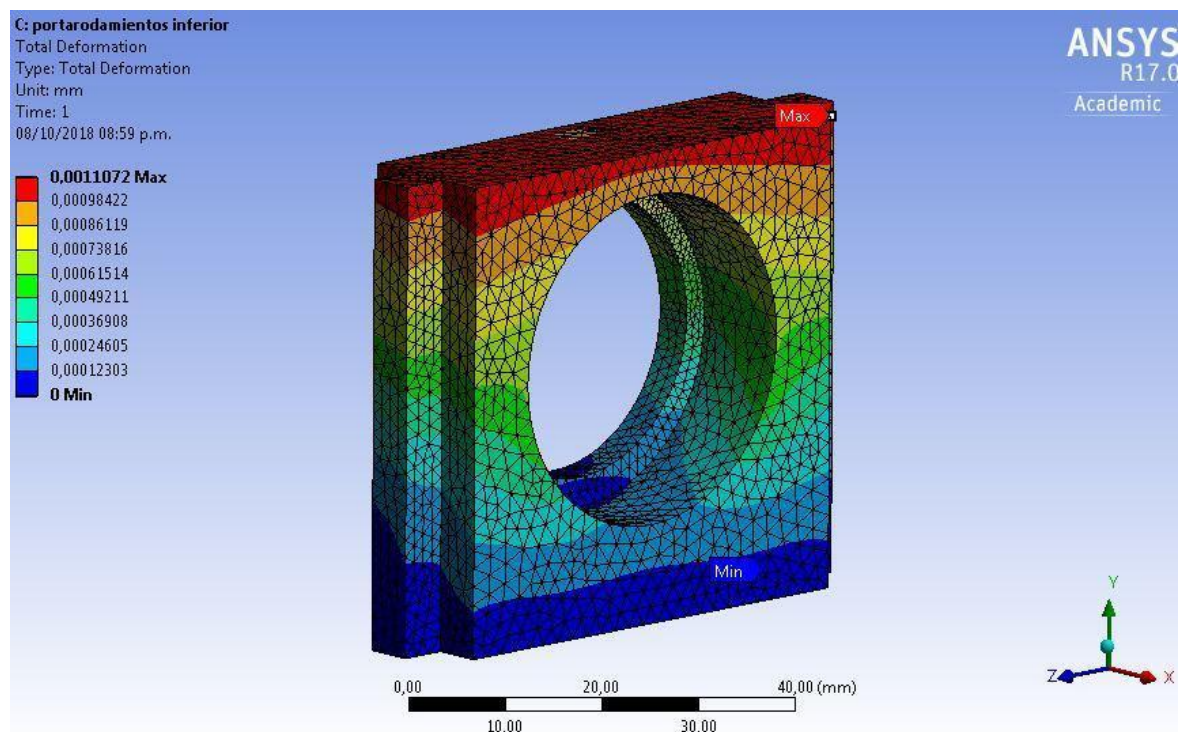
Teniendo en cuenta el valor máximo de esfuerzos el factor de seguridad es de:

$$FS = \frac{530 \text{ MPa}}{6,4 \text{ MPa}}$$

**Ecuación 46** Factor de seguridad.

El factor de seguridad de la pieza es de 82.812, teniendo en cuenta los parámetros iniciales de diseño la pieza cumple satisfactoriamente. La deformación que sufre la pieza con las cargas es de:

**Figura 4-19** Deformación total.

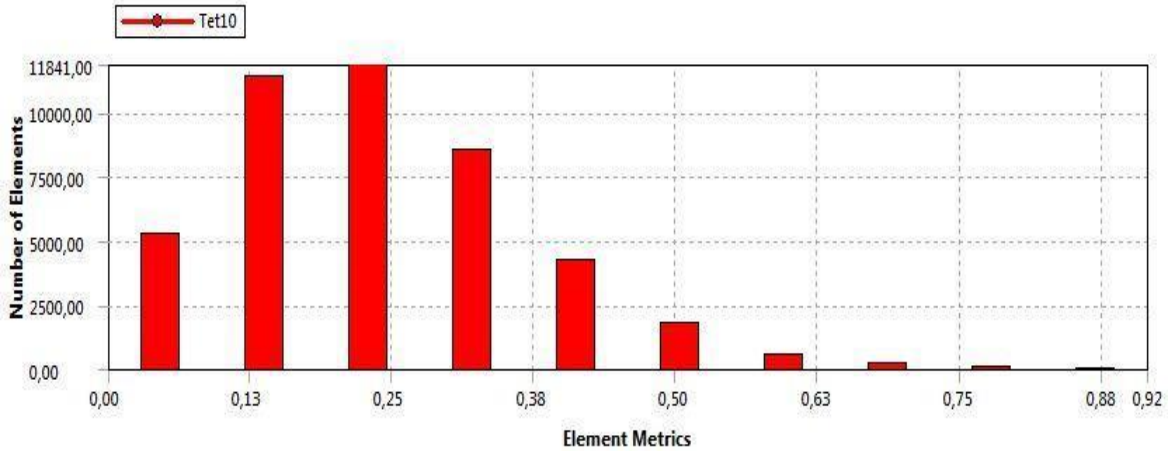


Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

La deformación máxima es de:

$\sigma_{max} = 0,0011072 \text{ mm}$

**Figura 4-20** Calidad de la malla empleada.



Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

#### 4.3.2.5 Placa de sujeción

La placa de sujeción permite el acoplamiento entre la camisa de extrusión y el dado diseñado. Las cargas que soporta la placa van más enfocadas en la presión que ejerce el plástico al ser extruido en el dado y la sujeción que tiene este a la placa.

**Tabla 4-10** Propiedades físicas y tamaño del mallado.

Propiedades	
Masa	0,26395 kg
Volumen	33625 m3
Malla	
Elementos	56253
Nodos	85034

Nombre de la fuente: Tabla de los autores.

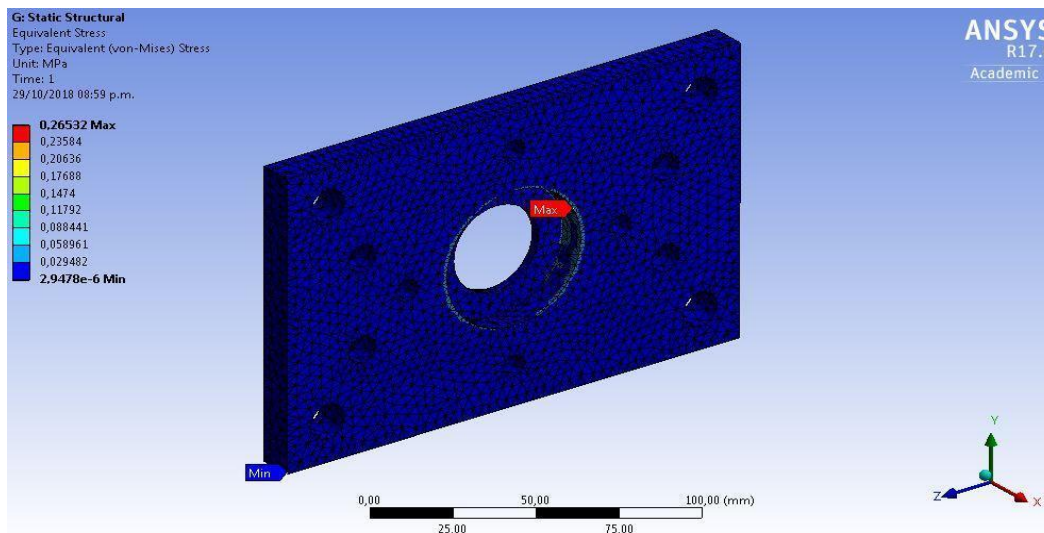
La placa está fabricada en acero SAE 4340 (Tabla 4-13) y es analizada por elementos finitos; como se observa a continuación los esfuerzos máximos son:

**Tabla 4-11** Propiedades del material.

Material	Acero SAE 4340
Densidad	7850 kg/m <sup>3</sup>
Límite elástico	710 N/mm <sup>2</sup>
Coefficiente de poisson	0.32 N/D
Esfuerzo último	1110 N/mm <sup>2</sup>

Nombre de la fuente: Tabla de propiedades de bases de datos ANSYS.

**Figura 4-21** Esfuerzos equivalentes de Von Mises.



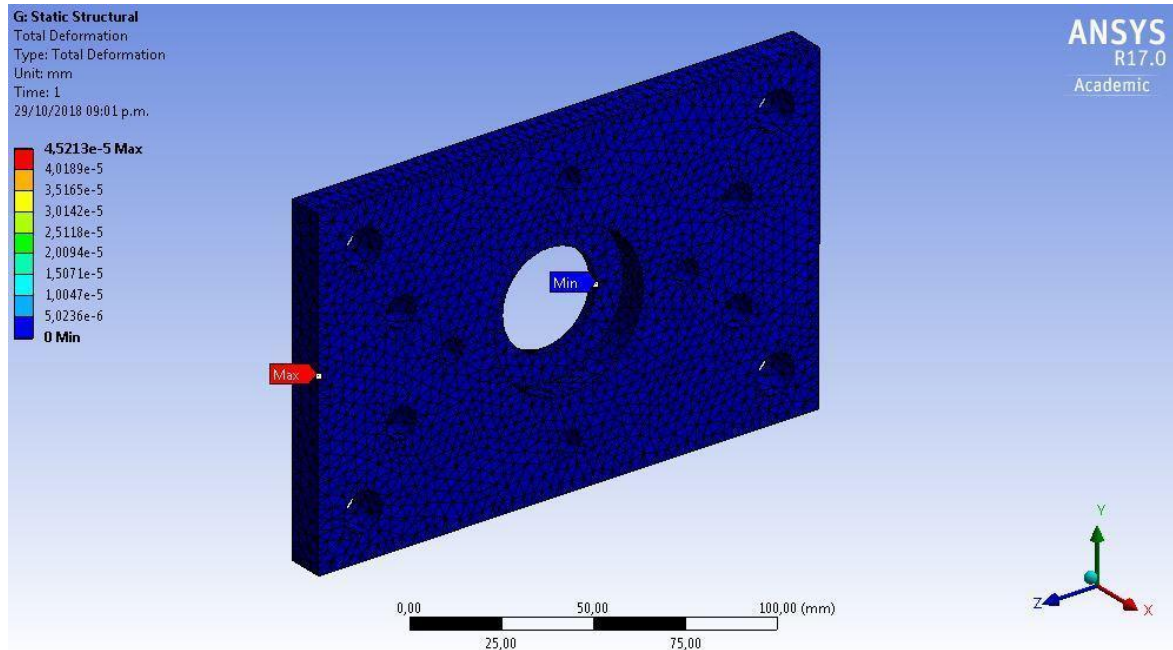
Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

El factor de seguridad del elemento es:

$$FS = \frac{700 \text{ MPa}}{0,26532 \text{ MPa}} = 2638,52$$

**Ecuación 47** Factor de seguridad.

**Figura 4-22** Deformación total.



Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

La deformación máxima que soporta la placa es de:

$$\sigma_{max} = 0,0000452 \text{ mm}$$

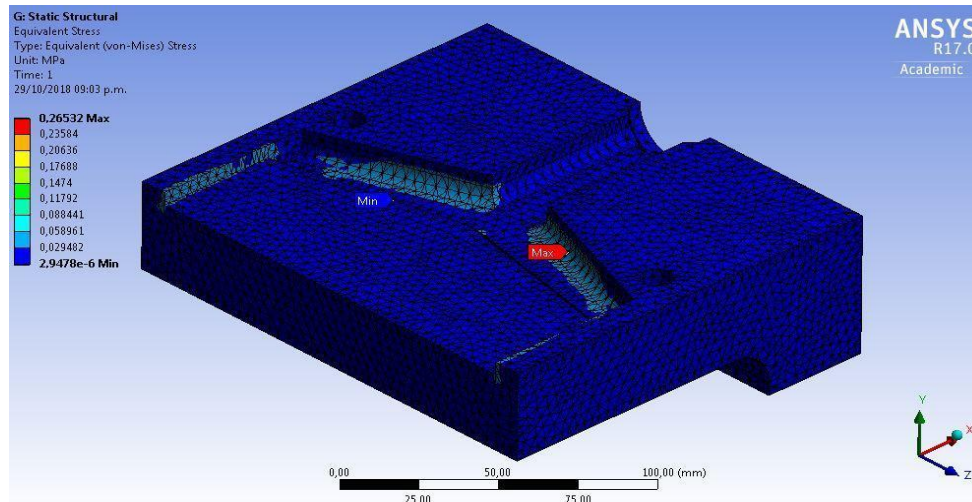
#### 4.3.2.6 Dado de extrusión

El dado es la pieza principal en la obtención de láminas planas, a través de este se genera una expansión controlada del plástico, en la cual pasamos de un área circular a una rectangular con las dimensiones establecidas previamente. Las cargas que soporta el dado van más enfocadas en la presión que ejerce el plástico al ser extruido en el dado y la sujeción que tiene este a la placa.

El dado está fabricado en acero SAE 4340 (Tabla 4-13) y es analizada por elementos finitos; como se observa a continuación los esfuerzos máximos son:

## Parte inferior

**Figura 4-23** Esfuerzos equivalentes de Von Mises



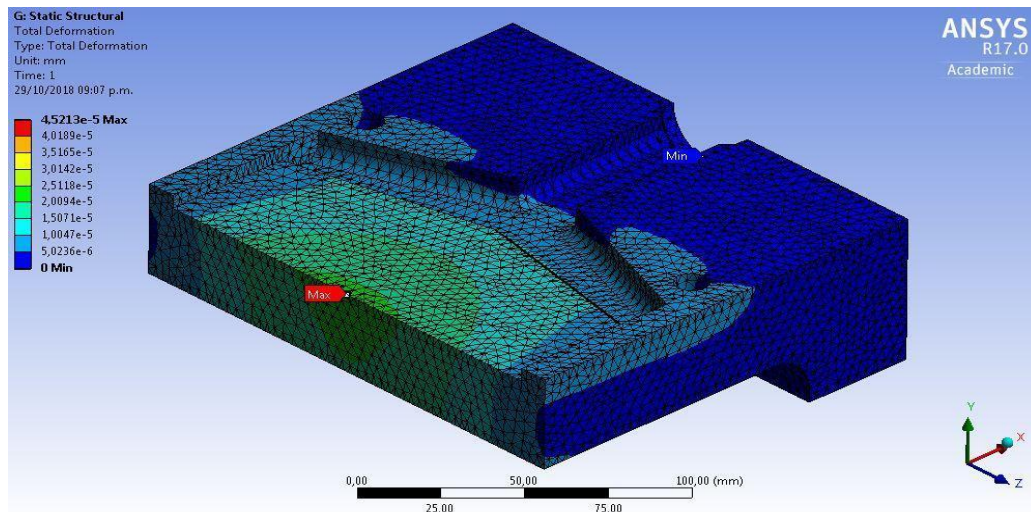
Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

El factor de seguridad del elemento es:

$$FS = \frac{700 \text{ MPa}}{0,26532 \text{ MPa}} = 2638,52$$

**Ecuación 48** Factor de seguridad.

**Figura 4-24** Deformación total.



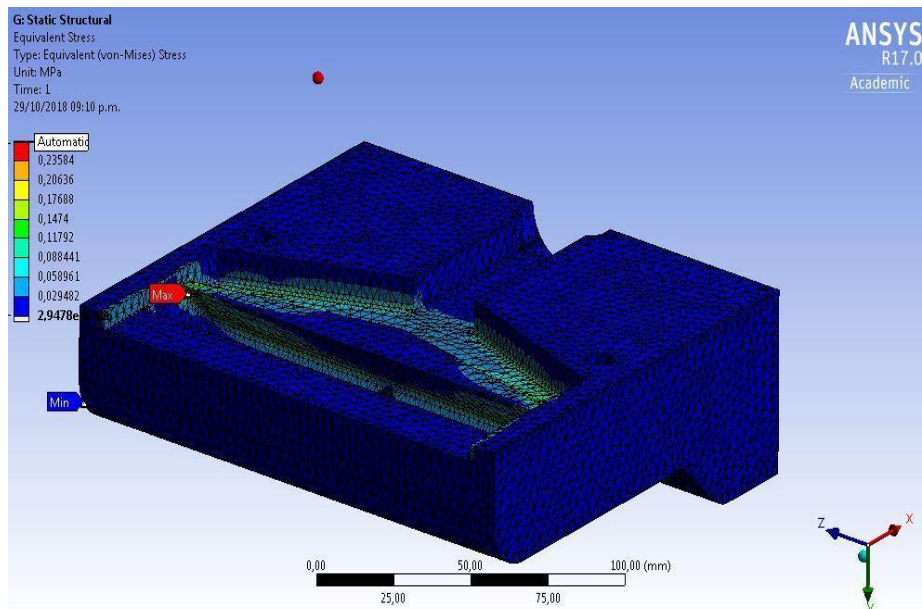
Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

La deformación máxima que soporta la parte inferior del dado es de:

$$\sigma_{max} = 0,00004521 \text{ mm}$$

### Parte superior

Figura 4-25 Esfuerzos equivalentes de Von Mises



Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

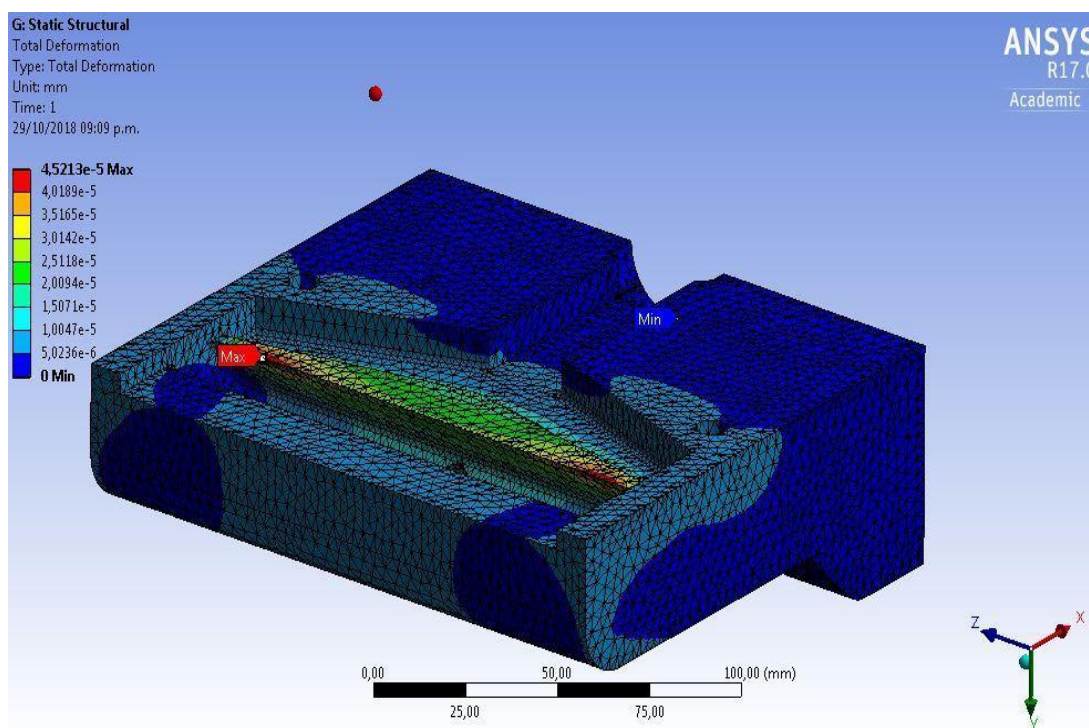


El factor de seguridad del elemento es:

$$FS = \frac{700 \text{ MPa}}{0,26532 \text{ MPa}} = 2638,52$$

**Ecuación 49** Factor de seguridad.

**Figura 4-26** Deformación total.



Nombre de la fuente: Imagen de los autores.

La deformación máxima que soporta la pieza superior del dado es de:

$$\sigma_{max} = 0,00004521 \text{ mm}$$

## 5 Conclusiones y recomendaciones.

### 5.2 Conclusiones

- Se fabricó un dado de extrusión tipo cola de pescado con una salida de 150 mm de ancho fijo y un regulador de caudal incorporado. Fabricado en acero SAE , posee un sistema de calentamiento a través de 4 resistencias tipo cartucho de 300 w de potencia.
- Se fabricó un sistema de laminado por rodillos en acero SAE 4140, con un sistema de nivelación para poder variar la distancia de separación entre los rodillos y asegurar una mejor impregnación del material sobre la fibra natural. También cada rodillo presenta su propio sistema de transmisión de potencia con motores DC de 24 voltios regulables acoplados directamente a cada eje.
- Para el diseño de los rodillos de laminación, la matemática que se utilizó es aplicada para procesos de laminación en frío; sin embargo optamos por utilizar esta información ya que el cálculo matemático presentado por la teoría de la calandra no cumplía con las especificaciones que deseamos para nuestro sistema, en cambio la teoría de laminado nos permite calcular las piezas dejando un amplio factor de seguridad ya que se está evaluando el material en frío, lo que permitirá que distintos materiales termoplásticos puedan ser usados en el sistema.
- En el área de diseño básico se establecieron algunos parámetros relacionados con el comportamiento térmico del dado bajo los conceptos de transferencia de calor. Teniendo en cuenta el comportamiento del dado térmicamente y el sistema de calentamiento por resistencias de cartucho queda como punto de partida para un nuevo proyecto, analizar detalladamente todo el comportamiento térmico de esta pieza pensando en cómo se puede mejorar el sistema de calentamiento y cómo optimizar energéticamente el proceso.



- Teniendo en cuenta que el sistema debía ser adaptado a la línea de extrusión que se encontraba en la universidad ECCI, surgió la necesidad de poder regular la velocidad del tornillo de extrusión para garantizar que toda la geometría interna del molde del dado fuera ocupada por completo uniformemente por el polímero fluidizado, por esta razón se realizó una modificación de la conexión eléctrica de la extrusora y se instaló un variador de frecuencia trifásico para controlar la velocidad del motor acoplado al tornillo.
- La obtención de este material compuesto en forma laminar puede ser usado como punto inicial de nuevos procesos de manufactura, entre las múltiples aplicaciones que podría tener el material encontramos el sector automotriz como uno de los principales beneficiados al poder aplicar este material compuesto a la fabricación de sus partes internas, o por qué no en la marroquinería como accesorios o piezas decorativas para bolsos, zapatos, etc. El límite del aprovechamiento del material está relacionado directamente con la aplicación que le pueda dar la industria.

## 5.3 Recomendaciones

- El uso de elementos de protección personal durante el proceso de extrusión es necesario ya que tenemos varios riesgos mecánicos por el funcionamiento del equipo, así como riesgo de quemaduras por la temperatura que alcanza todas las superficies del sistema, es obligatorio el uso de guantes de carnaza, gafas y tapa oídos.
- Antes de poner en funcionamiento el tornillo de extrusión durante la etapa de pre calentado es importante garantizar que toda la camisa y el dado se encuentren en la temperatura ideal para iniciar el proceso, así se tenga el control digital de temperatura es bueno tener otro sistema de medida externo como una pistola de temperatura o un termómetro infrarrojo ya que las termocuplas pueden presentar un desfase amplio durante su calentamiento y si el material no se calienta adecuadamente cuando el tornillo empiece a desplazarse no podrá desplazar el material y generará un esfuerzo máximo sobre el material sólido causando el rompimiento de juntas y cualquier otro sistema de sujeción entre el tornillo la caja reductora.
- Al finalizar el proceso de extrusión y antes de apagar la máquina es importante garantizar que todos los conductos por donde pasa el material queden desocupados; para esto es importante dejar trabajando un tiempo la extrusora hasta que por la boquilla del dado deje de salir material fluidizado; al hacer esto garantizará que no se formen tapones de plástico en distintas áreas del recorrido cuando la máquina se enfríe y que en próximas ocasiones cuando se vaya a utilizar de nuevo el equipo no se presente dificultad para desplazar el material.
- El equipo de extrusión se debe poner a punto, teniendo en cuenta no solamente garantizar el funcionamiento del sistema de calentamiento, sino también del mecanismo de avance, como lo es la transmisión de potencia, además de esto se deben mejorar los sistemas de sujeción de la camisa de extrusión, como también

renovar el cordón de soldadura de la salida de la camisa de extrusión, la cual presenta porosidades que no garantizan la repartición homogénea del peso del dado y las fuerzas resultantes por el empuje que genera el plástico a través del dado.

- Este proyecto queda abierto para ser optimizado, con la utilización de plataformas de diseño, teniendo en cuenta realizar un estudio del flujo térmico.
- Por seguridad se requiere correr la camisa de extrusión por lo menos 50 mm hacia adelante, para mejorar la facilidad del ensamble de los dados y evitar cortos eléctricos por las terminales de las resistencias.

## **A. Anexo: Planos.**

## Bibliografía

- [1] E. Spārniņš, "Mechanical Properties of Flax Fibers and Their Composites," p. 204, 2006.
- [2] K. L. Edwards, "A designers ' guide to engineering polymer technology," *Mater. Des.*, vol. 19, no. January, pp. 57–67, 1998.
- [3] B. Harris, E. Material, and G. Σ. Gpa, "Fig. 1 -A crossplied FRP laminate, showing nonuniform fiber packing and microcracking (from.)"
- [4] J. P. MERCHÁN, D. BALLESTEROS, I. C. JIMENEZ, J. A. MEDINA, and O. ÁLVAREZ, "Estudio De La Biodegradación Aerobia De Almidón Termoplástico (TPS)," *Rev. Latinoam. Metal. y Mater.* 2009, vol. 1, no. 1, pp. 39–44, 2009.
- [5] M. B. Michael Carus, Dr. Asta Eder, Lara Dammer, Dr. Hans Korte, Lena Scholz, Roland Essel, Elke Breitmayer and First, "Wood-Plastic Composites (WPC) and Natural Fibre Composites (NFC): European and Global Markets 2012 and Future Trends in Automotive and Construction," *Nov. Inst.*, vol. 12, no. 2, 2014.
- [6] T. Majewski and A. Bledzki, "Plásticos reforzados con fibras naturales en el sector automotriz," *Ideas en Cienc.*, vol. 52, no. 222, pp. 23–33, 2013.
- [7] M. P. Lucena, A. Suarez, and I. Zamudio, "Desarrollo De Un Material Compuesto a Base De Fibras De Bambu Para Aplicaciones Aeronauticas," *Rev. Latinoam. Metal. y Mater.*, vol. 1, no. 3, pp. 1107–1114, 2009.
- [8] A. Q. F. José Luis Suarez Castañeda, José William Restrepo Montoya, Adriana Quinchía Figueroa and 1, "Fibras vegetales colombianas como refuerzo en compuestos de matriz polimérica Colombian vegetal fibers as a reinforcement in polymeric matrix composites," *Tecnura*, vol. 21, no. 2017, pp. 57–66, 2017.
- [9] R. Cifuentes C, "Diseño de una maquina extrusora para la empresa Plastik de Occidente," UNiversidad del Valle, 2011.
- [10] J. Vlachopoulos and D. Strutt, "Polymer Processing: an Overview.," *Mater. Sci. Technol.*, vol. 19, no. 6, pp. 1161–1167, 2003.
- [11] M. Olivares Santiago, C. Galán Marín, and J. Roa Femández, "Los composites: características y aplicaciones en la edificación (composites: characteristics and applications in building construction)," Sevilla, 2003.
- [12] T. Richardson and E. Lokensgard, *INDUSTRIA DEL PLÁSTICO*. 1999.
- [13] A. Knits, "Tejidos antiguos, geotextiles modernos," 2009. [Online]. Available: <http://www.naturalfibres2009.org/es/fibras/>.
- [14] F. Díaz del Castillo, *Conformado de materiales plásticos*. Mexico D.F., 2012.
- [15] T. A. Osswald and J. P. Hernandez Ortiz, *Polymer Processing*. Madison, USA, 2006.

- [16] Mariano, "Extrusión de materiales plasticos," 2011. [Online]. Available: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.co/2011/03/extrusion-de-materiales-plasticos.html>. [Accessed: 15-Mar-2011].
- [17] K. Milivoje M and L. G. Reifschneider, "Design of extrusion dies," *Encycl. Chem. Process.*, pp. 633–649, 2006.
- [18] S. Kalpakjian and S. Schmid, *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*, 5th ed. 2008.
- [19] D. Rosato, D. Rosato, and M. Rosato, "CALENDERING," in *Plastic Product Material and Process Selection Handbook*, Elsevier Science, Ed. 4th August 2004, 2004, p. 618.
- [20] Mariano, "Calandrado," 2011. [Online]. Available: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.co/2011/10/calandrado.html?m=1>. [Accessed: 14-Oct-2011].
- [21] S. Ray, "Introduction to Rolling Process," in *Principles and Applications of Metal Rolling*, Cambridge University Press, no. i, Cambridge University Press, Ed. 2012, pp. 1–10.
- [22] C. A. De Castro, "Teorías de falla bajo cargas estáticas," 2014.
- [23] P. M. Kurowski, *Teaching Finite Element Analysis for Design Engineers*. 2011.
- [24] R. L. Norton, *Diseño de máquinas*, 4th ed. Prentice Hall.
- [25] C. O. [8] Shigley, J. E., Mischke, C. R., Bocanegra, F. P., & Correa, "Diseño en ingeniería mecánica (Vol. 8)."
- [26] DYNISCO, "The Die and Post Extrusion Equipment," Franklin.
- [27] M. P. Groover, *fundamentos de manufactura moderna*, 3rd ed. Mexico D.F., 2007.