



FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL MECÁNICA

DISEÑO Y VALIDACIÓN PARA LAMINADOR DE PERFILES DE ALUMINIO

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

PROF. GUÍA: ALVARO SALINAS

EMILIO MUÑOZ NÚÑEZ

**CURICÓ - CHILE
2020**

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



UNIVERSIDAD DE TALCA
DIRECCIÓN
SISTEMA DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD DE TALCA
SISTEMA DE BIBLIOTECAS
CAMPUS CURICO

Curicó, 2022

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia quienes fueron un pilar fundamental durante mi proceso de formación profesional. Gracias a mi madre quien colaboró en todo aspecto económico que me hizo despreocuparme de los pagos de la carrera, siempre me indicó que mi único deber era estudiar y en este sentido se agradece profundamente. A mi padre quien siempre me prestó la ayuda que necesitaba, además de pasarme a buscar cuando me quedaba hasta tarde trabajando en la universidad. A mi hermano con quien compartí los últimos tres años de carrera apoyando en todo lo que hacía. A mi abuela quien no está hoy conmigo en esta última etapa de mi vida, gracias a ella quien me cuidó y fue mi mamá sustituta durante mi infancia.

En segundo lugar, quiero agradecer a mi profesor guía Álvaro Salinas quien tuvo la paciencia de trabajar esta memoria conmigo, además confío en mí para poder realizarla. Por último, quiero agradecer a los amigos que formé en la universidad con quienes compartí diariamente estos años, por todos esos buenos momentos que pasamos en la facultad.

Emilio Ariel Muñoz Núñez

*Dedicada a mis padres
María Núñez Z. y David Muñoz L.
Por todos estos años de sacrificio*

RESUMEN

La laminación es deformar plásticamente un material cambiando sus dimensiones, pero manteniendo el volumen del material. En la Universidad de Talca campus Curicó, hay dos rodillos para laminación de alambres y probetas, además de un motor eléctrico que no es ocupado. Son los elementos vitales de un laminador, entonces el desarrollo de esta memoria es la creación de los planos de fabricación que tendrán una validación de los componentes más críticos para su posterior confección. El laminado será ocupado para la fabricación de alambres y probetas de aluminio que podrían ser ocupados en los laboratorios de materiales. Permitirá la investigación del comportamiento de la microestructura del metal, además de simulaciones con validación experimental. La laminación estudiada en esta memoria es en frío, y requiere mayor fuerza de laminación. La laminación en caliente puede ser una continuidad del estudio comenzado en esta memoria.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	1
1.3. SOLUCIÓN PROPUESTA	1
1.4. OBJETIVOS.....	2
1.4.1. Objetivo general	2
1.4.2. Objetivos específicos.....	2
1.5. RESULTADOS ESPERADOS	2
1.6. METODOLOGÍA.....	3
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 INTRODUCCIÓN.....	4
2.2 COMPORTAMIENTO ELÁSTO-PLÁSTICO.....	5
2.2.1 Leyes de endurecimiento	7
2.3 CONFORMADO EN LAMINACIÓN.....	8
2.3.1 Equipos de laminación	8
2.3.2 Clasificación de los trenes	10
2.3.3 Tipos de cajas	12
2.3.4 Laminadores de barras y perfiles.....	13
2.4 MICROESTRUCTURA.....	14
2.4.1 Deformación en cristales metálicos	16
2.5 VARIABLES EN LA LAMINACIÓN	17
2.5.1 Relación de volúmenes en unidad de tiempo	18
2.5.2 Espacio de laminación	18

2.5.3	Ángulo de laminación.....	19
2.5.4	Fuerza de laminación y torque.....	19
2.5.5	Esfuerzo de fluencia	21
2.5.6	Relación entre esfuerzos de fluencia medio y esfuerzo de laminación de planos 23	
2.5.7	Fricción durante el laminado	25
2.5.8	Temperatura en el laminado de metales	26
2.6	ALUMINIO Y ALEACIONES	27
2.6.1	Aleaciones de aluminio	27
CAPÍTULO 3. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN A LA PROBLEMÁTICA		7
PROCEDIMIENTO DE LA SOLUCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA.....		28
3.1	FACTORES EQUIVALENTES actores equivalentes; Error! Marcador no definido.	
3.1.1	Espesor inicial equivalente	¡Error! Marcador no definido.
3.1.2	Espesor final equivalente.....	¡Error! Marcador no definido.
3.1.3	Ancho del material	¡Error! Marcador no definido.
3.1.4	Esfuerzo de fluencia medio	33
3.2	CÁLCULOS DE VARIABLES EN LA LAMINACIÓN	36
3.2.1	Valores equivalentes a los de laminación plana.	36
3.2.2	Cálculo de la fuerza de laminación y torque necesario.	36
3.3	DISEÑO Y SELECCIÓN DE ELEMENTOS EN LA TRANSMISIÓN	37
3.3.1	Engranés de los rodillos.....	37
3.3.2	Esfuerzo de flexión en los engranes	38
3.3.3	Esfuerzo de contacto.....	45
3.3.4	Acople en la transmisión.	50

3.3.5	Chaveta para acople en la transmisión.	52
3.3.6	Chaveta para los engranes	53
3.3.7	Puntos de apoyo para los rodillos	54
3.4	DISEÑO DEL LAMINADOR.	58
3.4.1	Soportes de rodillos	60
3.4.2	Soporte inferior.....	61
3.4.3	Soporte superior.....	63
3.4.4	Base del laminador	65
3.4.5	Elementos de sujeción	66
3.4.6	Soldadura crítica.....	69
3.4.7	Estructura soportante de perfiles	71
3.4.8	Sistema de protección.....	73
3.4.9	Dimensionamiento de los componentes eléctricos.....	75
3.5	PLANOS DE FABRICACIÓN	78
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS		33
4.1	Estimación del trabajo en frío.....	79
4.1.1	Análisis del trabajo en frío	81
4.2	VALIDACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS.....	81
4.2.1	Análisis de resultados soporte inferior.	82
4.2.2	Análisis de resultados soporte superior	82
4.2.3	Análisis de resultados base del laminador	83
4.2.4	Análisis de resultados de la estructura metálica de perfiles	83
4.3	COMPONENTES Y MATERIAS PRIMAS DEL LAMINADOR	84
4.4	COSTOS.....	86
4.4.1	Análisis de los costos.....	86

CONCLUSIONES	88
REFERENCIAS	88
ANEXO 1: RESULTADOS OBTENIDOS DE MANERA ITERATIVA	90
ANEXO 2: PLANOS DE FABRICACIÓN	98
ANEXO 3: RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CARGA.....	107
ANEXO 4: DETALLE DE LOS COSTOS	111
ANEXO 5: CATÁLOGOS DE FABRICACIÓN	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 2.1 Procesos de conformado volumétrico. Fuente: Fundamento de la manufactura moderna. Groover y Mikell P	5
Ilustración 2.2 Curva de esfuerzo y deformación en tracción. Fuente: Fundamentos de la manufactura moderna.	6
Ilustración 2.3 Componentes principales del laminador. Fuente: Elaboración propia	8
Ilustración 2.4 Tren laminador. Fuente: Metalúrgica mecánica. Dieter y Geroge E.	9
Ilustración 2.5 Tipos de trenes industriales. Fuente: Laminación. Enriquez B., José L.	10
Ilustración 2.6 Cajas de uso industrial. Fuente: Metalúrgica mecánica. Dieter y Geroge E.	13
Ilustración 2.7 Cilindros para perfiles y canaletas. Fuente: Metalúrgica mecánica. Dieter y Geroge E.	14
Ilustración 2.8 Tipos de redes cristalinas. a) Red cristalina b) Red no cristalina. Fuente: Fundamentos de la manufactura moderna	15
Ilustración 2.9 Modelos de esferas. Fuente: Manufactura, Ingeniería y Tecnología. Sereope Schmid y Steven Kalpakijan	15
Ilustración 2.10 Tipos de deformaciones. Fuente: Mecánica de materiales. Russel C. Hibbler.	16
Ilustración 2.11 Factores principales de la laminación. Fuente: Manufactura, Ingeniería y Tecnología. Sereope Schmid y Steven Kalpakijan	17
Ilustración 3.1 Fotografía del estado actual de los rodillos. Fuente: elaboración propia	29
Ilustración 3.2 Diámetro inicial y final del material. Fuente: Elaboración propia	¡Error! Marcador no definido.
Ilustración 3.3 Vista frontal del material al pasar por el laminador. Fuente: elaboración propia	¡Error! Marcador no definido.
Ilustración 3.4 Dimensiones de las chavetas. Fuente: Normas DIN 6885	52
Ilustración 3.5 Primer boceto del laminador. Fuente: elaboración propia.	¡Error! Marcador no definido.
Ilustración 3.7 Representación de los componentes principales del laminador. Fuente: elaboración propia	59
Ilustración 3.8 análisis de fuerzas de corte ocurridas en el rodillo y los puntos de apoyo realizado en Inventor. Fuente: Elaboración propia	60

Ilustración 3.9Diseño realizado en Inventor Autodesk. Fuente: Elaboración propia	61
Ilustración 3.11Fuerza y puntos de apoyo de la estructura realizada en ANSYS. Fuente: elaboración propia	63
Ilustración 3.12Modelo del soporte superior realizado en Autodesk Inventor. Fuente: Elaboración propia.....	63
Ilustración 3.13Fuerza y puntos de apoyo del soporte superior realizado en ANSYS. Fuente: elaboración propia	64
Ilustración 3.14Dibujo tridimensional de la base del laminador realizado en Autodesk Inventor. Fuente: elaboración propia.....	65
Ilustración 3.15Fuerza aplicada y superficie de soporte de la base del laminador en ANSYS. Fuente: Elaboración propia.....	66
Ilustración 3.16Imagen de la estructura metálica realizada en Autodesk Inventor. Fuente: Elaboración Propia	72
Ilustración 3.18Distribución de las cargas y puntos de apoyo en ANSYS. Fuente: elaboración propia	73
Ilustración 3.19Sistema de protección diseñado en Autodesk Inventor. Fuente: elaboración propia.....	74
Ilustración 3.20Sistema de protección B diseñado en Autodesk Inventor. Fuente: Elaboración propia	74
Ilustración 3.21Circuito de control creado en CADE SIMU. Fuente elaboración propia.....	75
Ilustración 3.22Esquema del circuito de fuerza creado en Cade Simu. Fuente elaboración propia.....	76
Ilustración 4.1Vista en detalle de las canaletas de los rodillos realizado en Autodesk Inventor. Fuente: elaboración propia	79

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1 Esfuerzo de fluencia promedio y deformación necesaria en canaleta de 10 mm. Fuente: Elaboración propia.....	35
Gráfico 3.2 Factor de espesor del aro. Fuente: ANSI/AGMA 2001-D04.....	42
Gráfico 3.3 Factor geométrico de resistencia a la tracción. Fuente: AGMA 218.01	43
Gráfico 3.4 Factor de ciclos de esfuerzo. Fuente: ANSI/AGMA 2001-D04	44
Gráfico 3.5 Factor de ciclos de esfuerzo. Fuente: ANSI/AGMA 2001-DO4.....	50
Gráfico 3.6 Factor de carga para materiales de rodamientos de PTFE Y POM. Fuente: extraído el 20 de noviembre del 2020, www.SKF.com	56
Gráfico 3.7 Factor de velocidad para materiales de rodamientos de PTFE Y POM. Fuente: extraído el 20 de noviembre del 2020, www.SKF.com	57
Gráfico 3.8 Factor de temperatura para materiales de rodamientos de PTFE Y POM. Fuente: extraído el 20 de noviembre del 2020, www.SKF.com	57
Gráfico 3.9 Factor de rugosidad para materiales de rodamientos de PTFE Y POM. Fuente: extraído el 20 de noviembre del 2020, www.SKF.com	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Tren laminador. Fuente: Metalúrgica mecánica	9
Tabla 2.2 Valores característicos a temperatura ambiente. Fuente: Manufactura, Ingeniería y Tecnología. Sereope Schmid y Steven Kalpakijan.....	22
Tabla 2.3 Coeficiente de roce en laminado en frío. Fuente: Manufactura, Ingeniería y Tecnología. Sereope Schmid y Steven Kalpakijan.....	25
Tabla 2.4 Aleaciones de aluminio. Fuente: Elaboración propia.....	27
Tabla 2.5 Designación de los tratamientos térmicos. Fuente: Ingeniería, Consultoría y Formación, Ingemeccánica.....	28
Tabla 3.1. Propiedades del motor eléctrico. Fuente: Elaboración propia.....	28
Tabla 3.2 Constantes característicos de aluminios a temperatura ambiente. Fuente: extraído el 20 de noviembre del 2020, www.matweb.com).....	33
Tabla 3.3 Resultados obtenidos de la caracterización del material. Fuente: elaboración propia.....	36
Tabla 3.4 Dimensiones tentativas. Fuente: Elaboración propia.	37
Tabla 3.5 Propiedades mecánicas del acero AISI 4340. Fuente: Información recuperado el 20 de octubre del 2020, http://www.matweb.com/	38
Tabla 3.6 Tabla de factores de sobrecarga. Fuente: ANSIS/AGMA 2001-DO4 y 2101-D04 ..	39
Tabla 3.7 Constantes empíricas A, B y C. Fuente: ANSI/AGMA 2001-D04.....	41
Tabla 3.8 Factores de confiabilidad. Fuente: ANSI/AGMA 2001-D04.....	45
Tabla 3.9 Coeficiente elástico. Fuente: AGMA 218.01	47
Tabla 3.10 Factores de seguridad. Fuente: extraído el 10 de noviembre del 2020, https://www.vulkan.com/es-es/drivetech/Documents/Rigid-Couplings-Technical-Data-ES-PT.pdf	51
Tabla 3.11 Propiedades mecánicas del acero ASTM A36. Fuente: elaboración propia	52
Tabla 3.12 Materias primas utilizadas en el soporte inferior. Fuente: Elaboración propia.....	61
Tabla 3.13 Propiedades de los aluminios. Fuente: extraído del 21 de noviembre, www.matweb.com	62

Tabla 3.14Materias primas y descripción basado en catálogos de fabricantes. Fuente: elaboración propia	64
Tabla 3.15Material necesario para la fabricación. Fuente: elaboración propia.....	65
Tabla 3.16Propiedades del perno M12 Sp 5.8. Fuente: Catalogo de frabricantes Sodiper.....	68
Tabla 3.17Esfuerzos permisibles del código AISC para metal de aporte. Fuente: Diseño de Ingeniería, Shigley.....	69
Tabla 3.18Esfuerzos de corte permisibles de los electrodos. Fuente: Diseño de ingeniería mecánica, Shigley, 2008+.....	71
Tabla 3.19Características del perfil. Fuente: extraído el 23 de noviembre, www. kapeuf.cl....	71
Tabla 3.20Detalle de componentes y fuerza ejercida. Fuente: elaboración propia	72
Tabla 3.21 Detalles de los componentes del laminador. Fuente: elaboración propia	72
Tabla 3.22Selección de los componentes eléctricos y descripción. Fuente: elaboración propia	77
Tabla 4.1Trabajo en frío del aluminio 1100-O. Fuente: elaboración propia..	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 4.2Trabajo en frío para aluminio 2024-T4. Fuente: elaboración propia	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 4.3Trabajo en frío del aluminio 6061-O. Fuente: elaboración propia..	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 4.4Trabajo en frío del aluminio 6061-T6. Fuente: elaboración propia	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 4.5Trabajo en frío del aluminio 7075-O. Fuente elaboración propia ...	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 4.6Resultados obtenidos del análisis de cargas con el programa ANSYS. Fuente: elaboración propia	82
Tabla 4.7Resumen de los costos obtenidos. Fuente: elaboración propia	86
Tabla 4.8Detalle de los costos de la material prima. Fuente: elaboración propia	111

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

La laminación es un proceso de maquinado en donde se deforma de tal manera que cambia la sección del material, es un proceso sin arranque de viruta. Se pueden obtener en este proceso la reducción de espesores de chapas, alambrones, perfiles, electrodos entre las formas más básicas de producción. El electrodo puede ser utilizado en ensayos mecánicos que permiten estudiar el comportamiento del material ante deformaciones.

En la Universidad de Talca campus Curicó, ubicada en los Niches se encuentra ubicada la Facultad de Ingeniería, en la que se imparte, entre otras, las carreras de Ingeniería Civil Mecánica y Civil Mecatrónica. Ambas comparten los talleres tecnológicos que en la actualidad no tienen un laminador, dicho laminador permitiría la confección de Alambrones y electrodos.

1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En los talleres tecnológicos de la Universidad no se dispone actualmente de un laminador para el conformado de perfiles. El proceso de laminado es visto y estudiado en ramos de ambas carreras: deformaciones existentes en el proceso y los componentes que permiten al laminador funcionar, por tanto, la existencia de este equipo contribuiría de modo significativo en el proceso de aprendizaje de estos módulos. Por otro lado, considerando el proceso y los materiales conformados mediante un laminador, es posible realizar estudios referidos a evolución de microestructura y propiedades mecánicas de materiales conformados, simulación numérica y otros temas afines a materiales de ingeniería. Pues esta razón, un equipo de estas características permitiría extender la propuesta de desarrollo de investigaciones y proyectos.

1.3. SOLUCIÓN PROPUESTA

Existen dos rodillos de laminador en la universidad que necesitan un pequeño trabajo superficial para dejarlos operativos, además en el taller de mecánica hay un motor trifásico que está dispuesto para este proyecto. Con los ramos cursados en estos años la propuesta de solución se basa en tres grandes áreas y estas son: materiales, diseño de máquinas y mecánica

Capítulo 1. Introducción

computacional. Se aplican conocimientos adquiridos en materiales que permiten estudiar las deformaciones y esfuerzos que provoca el laminador, entendiendo el concepto básico de trabajo que aplica. Luego se crean los sistemas de transmisión de potencia, selección de engranes, elementos de soporte de rodillos y armado de estructura que todos estos contenidos son estudiados a profundidad en diseño de máquinas. Por último, todas las estructuras dimensionadas y elementos soportantes son respaldados con diseños computacionales que luego son sometidos a diversas situaciones para obtener comportamiento del prototipo, estas estimaciones se relacionan con la materia revisada en mecánica computacional.

Ahora considerando los componentes disponibles y los aprendizajes adquiridos en el proceso de formación, se dispone la capacidad para poder fabricar un laminador. El mercado de ventas de máquinas se enfoca en la venta de laminadores para joyería lo que hace la dificultad de comprarla, además en la universidad están los componentes críticos que permitirían su confección, abaratando costos.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Diseñar y validar equipo de laminación para alambrones, electrodos y perfiles de aluminio para laboratorios tecnológicos de la facultad de ingeniería de la Universidad de Talca.

1.4.2. Objetivos específicos

- Estimar el porcentaje de trabajo en frío asociado a las características del equipo.
- Calcular parámetros característicos del diseño de la máquina
- Seleccionar materiales adecuados para la confección de la estructura soportante
- Dibujar planos de fabricación del laminador

1.5. RESULTADOS ESPERADOS

Capítulo 1. Introducción

El objetivo final es crear los planos de fabricación para que se pueda fabricar. El laminador permitirá trabajar en frío alambrones y perfiles cuadrados de aluminio. Esta máquina herramienta estará disponible en la Universidad de Talca para el uso de los estudiantes y docentes. Estará conectado a la red trifásica, con el dimensionamiento de los elementos de protección térmica y eléctrica. Permitirá el laminador un fácil desmontaje de sus componentes tanto mecánicos como estructurales en caso de querer realizar mantención.

Se creará un manual de uso que permite a cualquier persona autorizada a su operación logre utilizarla sin problemas. En esta guía estarán las indicaciones de operación y mantenimiento para la correcta conservación del bien.

1.6. METODOLOGÍA

Los componentes fundamentales del laminador como son los rodillos, el motor y los bujes ya se encuentran disponibles. El motor es la pieza fundamental del laminador ya que entrega la velocidad de giro y el torque de la máquina. Con los datos técnicos que entrega el motor y las relaciones entre los cilindros se puede estimar el comportamiento en la zona de deformación del aluminio, aplicando un modelo adecuado de endurecimiento y suponiendo un modelo del comportamiento isotrópico del material. Con modelos numéricos del comportamiento mecánico del material a deformar, existentes en literatura, se puede determinar las capacidades máximas de trabajo de la máquina sobre el material. En estos momentos es necesario crear un diseño estructural en donde se determinen los elementos de transmisión de potencia mecánica desde el motor hacía los rodillos. La velocidad y potencia del motor determinaran la relación de transmisión entre el motor y los rodillos, esto hace que cambie el módulo de los engranes y pone en cuestión agregar un reductor de velocidad en el diseño. Las consideraciones para su fabricación es tener un fácil acceso a sus partes móviles, protecciones para resguardar la integridad del usuario y las piezas sean de fácil adquisición para su reemplazo.

Se realizará un diseño tridimensional que tendrá validación con programas que aseguren que al momento de utilizarla adecuadamente no falle o que la estructura soportante se rompa.

Capítulo 1. Introducción

Se presentará una estimación de costos que conlleva su fabricación, finalizando con un manual de uso y mantenimientos recomendados.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 INTRODUCCIÓN

En la conformación se modifica plásticamente la forma del material para obtener alambres, planchas, varillas o formas que no es necesario arrancar viruta. Para fabricar estos materiales se aplican cargas externas que suelen ser de tracción, flexión o compresión. El trabajo en estos procesos consiste en someter al material a un esfuerzo suficiente para que fluya plásticamente y tome la forma deseada. En la figura 2.1 se aprecian cuatro procesos diferentes de conformado, en la primera imagen se aprecia el laminado, aquí se aplica compresión al material deformando el espesor de una plancha por medio de rodillos. En la figura 2.1 b) es la forja y el material pasa a ser comprimido entre troqueles reiteradas veces. La tercera imagen 2.1 c) es la extrusión y aquí se hace fluir el metal a través de una abertura de un troquel para tomar la forma de este. El estirado se puede apreciar en la imagen 2.1 d) en donde el diámetro de un alambre o barra se reduce al tirar por la abertura del troquel (Fundamentos de la manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas, Groover y Mikell P., 1997, p. 380).

En esta memoria se enfoca en el laminador de perfiles circulares y cuadrados que se usan para la confección de alambres y electrodos. La deformación se produce cambiando la sección del material, se logra al pasar el material entre los rodillos con muescas.

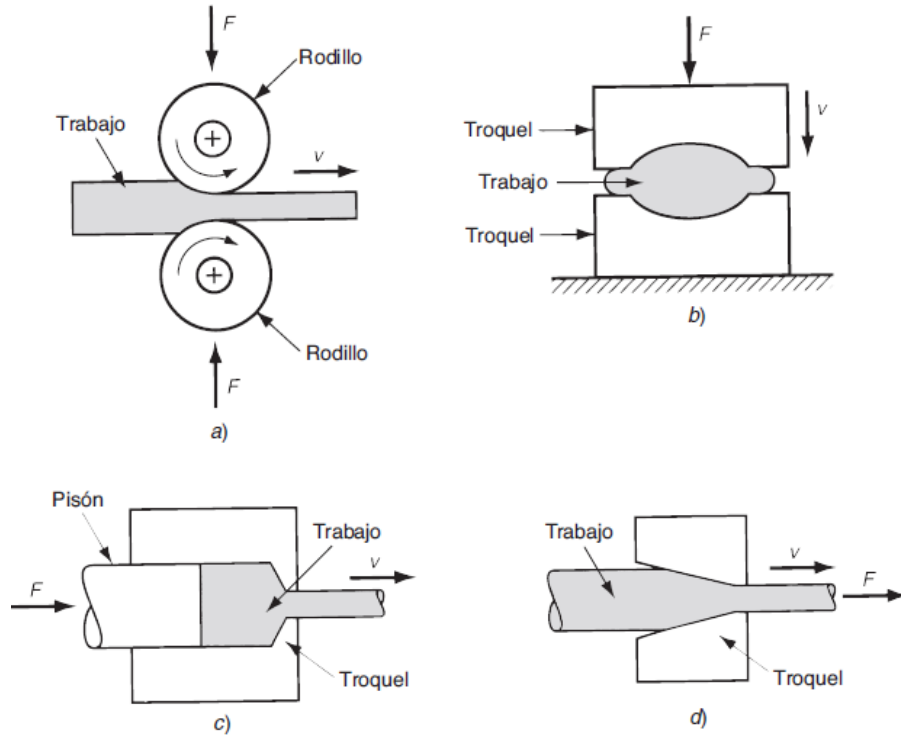


Ilustración 2.1 Procesos de conformado volumétrico. Fuente: Fundamento de la manufactura moderna. Groover y Mikell P

2.2 COMPORTAMIENTO ELASTO-PLÁSTICO EN METALES

Como es sabido, en el campo de la mecánica de sólidos se define como esfuerzo a reacción interna de un material a las cargas externas, por unidad de área. Los materiales pueden estar sujetos a tres tipos de esfuerzos y estos son: de compresión, de tensión y cortante. Los esfuerzos de compresión se aplican cargas en donde el material tiende a reducir su espacio tridimensional (compresión), mientras que en el esfuerzo de tensión se estira el material provocando alargamiento. Los esfuerzos cortantes son resistencias internas que tiene el material ante una carga aplicada de tal manera que permita la separación de su forma inicial. Una primera forma de comprender el comportamiento mecánico de los materiales es a través del gráfico esfuerzo-deformación ingenieril obtenido mediante un ensayo de tracción. La figura 2.2. muestra una curva esfuerzo-deformación ingenieril característica de materiales metálicos.

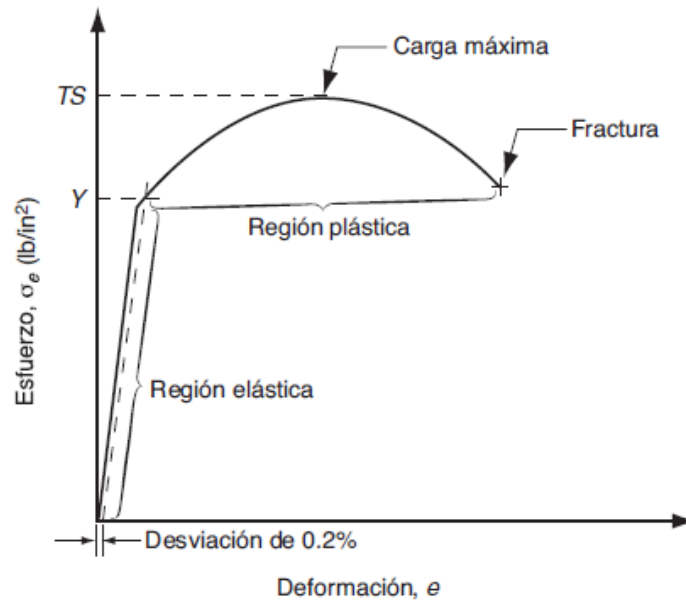


Ilustración 2.2 Curva de esfuerzo y deformación en tracción. Fuente: Fundamentos de la manufactura moderna.

Se puede apreciar que la figura 2.2 tiene dos regiones que indican el comportamiento del material. La primera región es la elástica y se caracteriza porque si se retira la carga al material debiese volver a sus dimensiones originales. La relación esfuerzo-deformación es lineal y queda descrita por la ley de Hook.

(1)

$$\sigma_e = Ee$$

Esta ley hace la relación entre el esfuerzo y la deformación como se observa en la ecuación 1, en donde E es una constante que se conoce como módulo de elasticidad, y en una propiedad del material a deformar, y e representa el porcentaje de deformación.

Cuando el esfuerzo aumenta el material entra a la segunda región conocida como plástica. El paso de una región a otra en el gráfico está señalado con la letra Y, se llama límite de fluencia. La curva en la región plástica es no lineal. Bajo este régimen, si la carga sobre el material deja de aplicarse, este ya no recupera sus dimensiones originales (Fundamentos de la manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas, Groover y Mikell P., 1997, p. 40).

Si continúa aumentando la carga, la curva alcanza a un valor de esfuerzo máximo, aquí se forma la estricción y la deformación se concentra en una sola sección, esto da origen a una forma de cuello de botella que posteriormente termina en la rotura. El esfuerzo máximo que alcanza el material se conoce como resistencia máxima a la tracción y en la figura 2.2 se denota con la sigla TS (Última resistencia a la tracción).

2.2.1 Leyes de endurecimiento

La descripción del comportamiento de la curva esfuerzo-deformación y del endurecimiento que experimenta un metal, es a través de expresiones matemáticas. Estas describen comportamientos elasto-plástico, debido a que la zona plástica de la curva depende de parámetros que predicen los mecanismos de formabilidad y deformación del material (Metalúrgica mecánica, Dieter y George E., 1967, p. 316). Una de las expresiones más utilizadas para predecir el comportamiento plástico de metales dúctiles es la ecuación de Hollomon que se presenta a continuación:

(2)

$$\sigma = K * \varepsilon^n$$

Esta ecuación establece una ley de potencial, donde K es una constante equivalente para cada material nombrada como coeficiente de resistencia, n es el coeficiente de endurecimiento por deformación y es igual al valor de deformación última del material. Una de las aplicaciones de la ecuación de Hollomon es la evaluación de la formabilidad, a través del coeficiente de endurecimiento por deformación. Es importante resaltar que la expresión es empírica que no puede describir exactamente la curva esfuerzo-deformación para todos los metales. Hay relaciones empíricas que aún no tienen sentido físico conocido, proporcionan mejores aproximaciones a valores experimentales como son los modelos de Ludwik y Swift. Ambos casos incluyen el efecto de endurecimiento del material por trabajo en frío.

Otro modelo muy utilizado es el de Ramberg-Osgood, que se muestra en la ecuación 3 el cual utiliza una ecuación de tres parámetros para expresar la relación entre el esfuerzo (S) y la deformación ingenieril (e) hasta un valor ligeramente mayor al esfuerzo de fluencia del

material. Los tres parámetros considerados son el módulo de elasticidad (E_0), la resistencia a la fluencia ($S_{0.2}$) y el parámetro (n) que define la forma de la curva (Comportamiento elastoplástico en tracción de láminas de acero ASTM A-569, Aparicio, Gennifer, Armas, Heber, 2007, p. 58.)

(3)

$$e = \frac{S}{E_0} + 0,002 * \left(\frac{S}{S_{0.2}}\right)^n ; \quad S \leq S_{0.2}$$

2.3 CONFORMADO EN LAMINACIÓN

El marco teórico en esta sección es para comprender más en detalle a estas herramientas, mostrando los tipos existentes, las deformaciones que pueden provocar y los procesos en donde afecta la temperatura.

Los laminadores son máquinas herramientas que deforman los metales de forma plástica haciéndolos pasar entre cilindros. Se someten los metales a grandes tensiones de compresión, por el aplastamiento de los cilindros y tensiones superficiales originadas por la fricción entre el cilindro y el metal. El resultado del proceso es una disminución en el espesor (para el caso de conformado de planchas), o reducción del área (en el caso de barras, alambrones o perfiles).

2.3.1 Equipos de laminación

Los principales componentes son los cilindros que se encargan de la deformación, cojinetes que permiten el fácil movimiento de los cilindros, columnas de soportes que mantienen

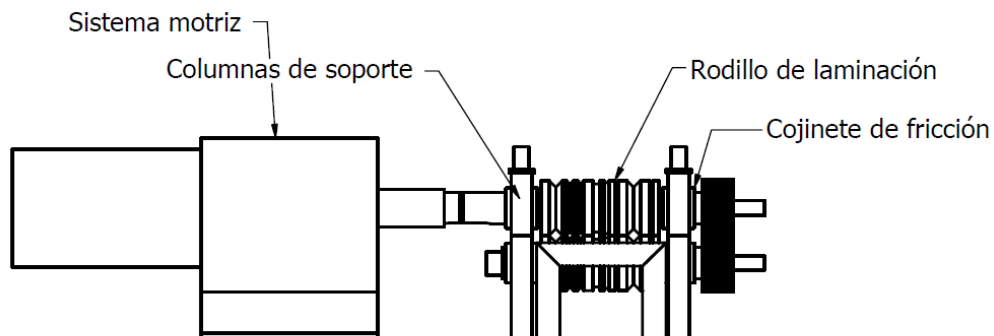


Ilustración 2.3 Componentes principales del laminador. Fuente: Elaboración propia

Capítulo 2. Marco Teórico

a los cilindros como cojinetes y el sistema motriz que entrega la potencia y velocidad necesaria para deformar a los metales. En la figura 2.3 se presentan los componentes principales del laminador.

Las máquinas laminadoras en los procesos de fundición suelen ser robustas, ya que la cantidad que procesan es alta deformando materiales de grandes dimensiones. En la industria del acero se acoplan los laminadores de manera que el material mantenga una sola línea de producción y es comúnmente utilizado cuando se procesan grandes cantidades de materiales que son relativamente duros y se quiere lograr un lingote o chapa de espesores delgados. A todo este conjunto se conocen como trenes laminadores y al separar laminador por laminador son llamados cajas. Las cajas de los trenes funcionan a diferentes velocidades produciendo una línea continua de producción. Esta diferencia de velocidad se hace debido a que, al deformar el material de manera plástica, este aumenta su longitud modificando la velocidad de avance en cada caja (Metalúrgica mecánica, Dieter y George E., 1967, p. 523). En los extremos de los trenes existen cilindros encargados de alimentar por un extremo y recoger por el otro, se llaman bobinadores que además de alimentar al tren, mantienen una tensión constante en sus extremos para prohibir el atascamiento como se puede apreciar en la siguiente figura 2.3 de un tren laminador:

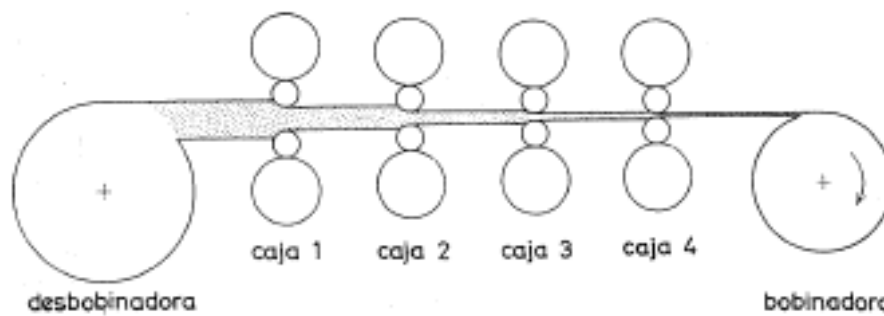
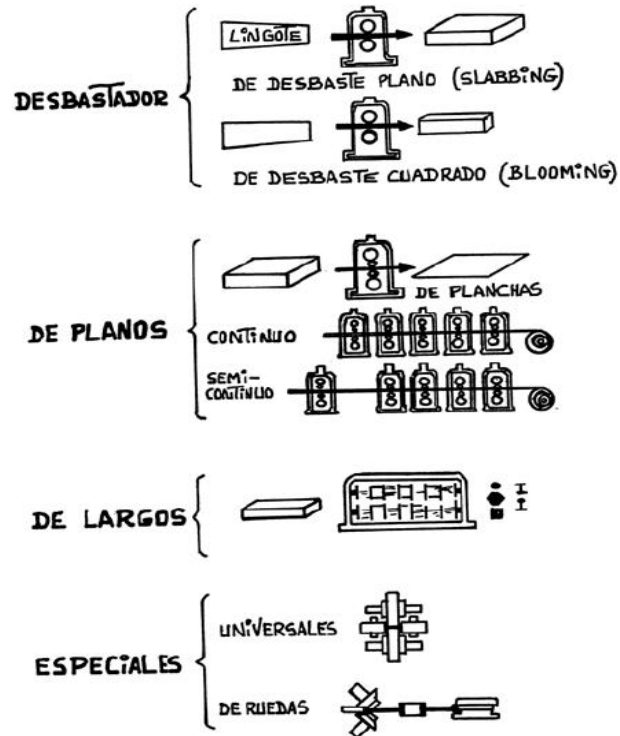


Ilustración 2.4 Tren laminador. Fuente: Metalúrgica mecánica. Dieter y Geroge E.

2.3.2 Clasificación de los trenes

Los trenes pueden ser constituidos según el número y disposición de las cajas en donde estas variables dependen del requerimiento del producto final como se muestra en la figura 2.4. Las cajas están dispuestas una a continuación de la otra con la finalidad de que el laminado se



encuentre bajo la acción de estas o más. A continuación, se presentan los tipos de trenes

Ilustración 2.5 Tipos de trenes industriales. Fuente:

Laminación. Enriquez B., José L.

existentes en la industria de los metales:

Trenes devastadores: Laminan los lingotes obtenidos de los procesos de fundición específicamente en colada o colada continua de grandes espesores. Debido a las grandes dimensiones de los lingotes se requieren trenes robustos que deben conseguir grandes reducciones siendo de precios elevados. Básicamente existen dos clases de devastadores los trenes blooming que laminan lingotes de secciones cuadradas que luego de laminar se obtienen productos largos y los trenes slabbing que laminan lingotes planos para terminar siendo planos.

Capítulo 2. Marco Teórico

A la vez existe un híbrido entre las dos clases anteriormente nombrada llamándose blooming-slabbing (Laminación, Enríquez Berciano y José Luis, 2010, p.23).

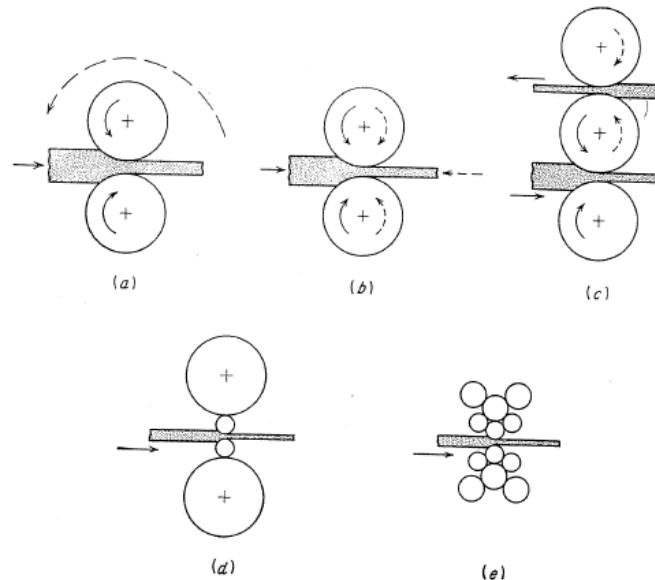
Trenes planos: Laminan los productos que se obtienen de los trenes de devastado transformándose en planchas de chapa gruesa o en bobinas de banda. Hay tres tipos de trenes planos como se muestra en la figura 2.4, la primera sección es el modelo general con cajas reversibles más simple de todos, mientras que los laminadores planos continuos están pensados para grandes producciones con cajas dispuestas una tras otra para obtener chapa fina y los trenes planos semicontinuos se mantiene la misma utilidad que el anterior, pero comienzan con devastador reversible que entrega varias pasadas para terminar con el laminado plano(Laminación, Enríquez Berciano y José Luis, 2010, p.24).

Trenes de largos: En estos trenes obtienen como producto final perfiles, barras, canaletas o productos de distintas secciones. Los cilindros en estas cajas disponen las matrices para la forma final del producto, generalmente estos cilindros están en cajas dúos reversibles, la gran diferencia con los otros trenes que las cajas no están de manera continuo si no que en paralelo llamados trenes “Cross-country” en donde existen varias cajas accionadas por el mismo motor. El cilindro se aprovecha al máximo por caja y este posee varias guías con diferentes tamaños y formas, su única limitación es la longitud del material que le llega a deformar (Laminación, Enríquez Berciano y José Luis, 2010, p.24).

Trenes especiales: Estos trenes son utilizados para obtener perfiles estructurales, angulares, en forma de T y en U. La diferencia con los otros trenes es que se ejerce presión con cilindros dispuestos de forma vertical a la salida de la laminación que permiten cantear los bordes de las chapas. La combinación de cilindros horizontales y verticales se conocen comúnmente como trenes Universales. Existen los trenes planetarios que disponen de cilindros con forma cónica que permiten la elaboración de las llantas de los vehículos como se muestra en la figura 2.4 (Laminación, Enríquez Berciano y José Luis, 2010, p.25)

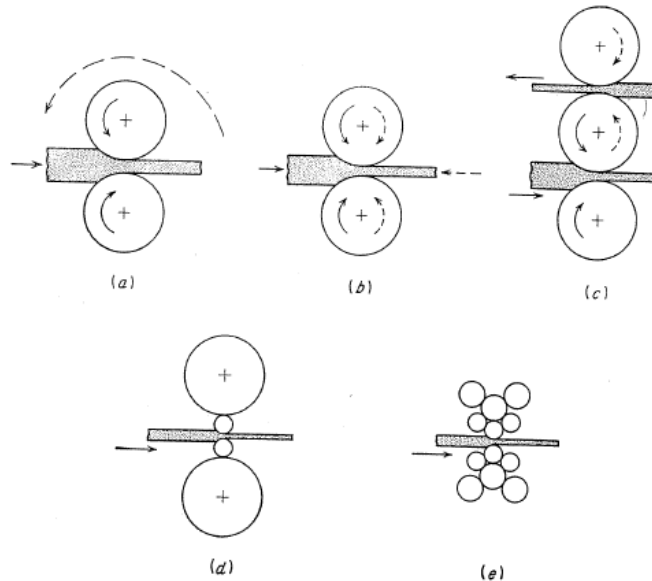
2.3.3 Tipos de cajas

Al momento de analizar un laminador por separado se pueden clasificar según el número de cilindros que disponga para poder realizar la deformación, disposiciones y los sentidos de giro que puedan realizar como se aprecia en la figura 2.5. La primera imagen 2.5 a) corresponde a la caja de cilindros dúos siendo la más simple de todas ya que posee los diámetros idénticos y con sentidos de giro opuestos entre los cilindros; el material se hace ingreso por un extremo de la caja pasando entre los cilindros, la única diferencia con la figura 2.5 b) es que permite la inversión de giro permitiendo la disminución de tiempos de deformación ya que no es necesario hacer el reingreso del material por el mismo extremo de la caja porque avanza y retrocede reiteradas veces. La figura 2.5 c) es un laminador trio que contiene dos cilindros accionados de manera mecánica y el tercero funciona por fricción siendo capaces de procesar dos metales a la misma vez. Los mismos rodillos pueden ser utilizados para reducir la potencia necesaria para su funcionamiento como se ocupan diferentes diámetros implica que si un cilindro entrega una vuelta el de menor diámetro entregará dos más vueltas según la situación lo amerite, este caso es comúnmente ocupado las relaciones de diámetros en las cajas reductoras de velocidad como se muestra en la figura 2.5 d). En donde es necesario un trabajo más prolijo de mayor precisión se utilizan cilindros de menores diámetros que lo permiten, además que permite espesores



pequeños ocupando las relaciones anteriormente nombradas mostradas en la figura 2.5 e) (Metalúrgica mecánica, Dieter y George E., 1967, p. 522).

Ilustración 2.6 Cajas de uso industrial. Fuente: Metalúrgica mecánica. Dieter y Geroge E.



2.3.4 Laminadores de barras y perfiles

En las laminaciones de barras y perfiles la deformación se produce en varias direcciones a diferencia de las chapas y es necesario para las deformaciones de perfiles cuadrados pasarlo nuevamente. El método común para reducir de una barra cuadrada a una redonda es pasar por la canaleta ovalada obteniendo una forma intermedia finalizando la deformación en la guía final. Las cajas que permiten estos procesos son comúnmente entre dos cilindros a tres cilindros y al conjunto de cajas comúnmente en la industria se les conoce tren de redondos o comercial. La constitución tradicional de estas herramientas es que en el mismo tren dispongan de tres cajas, una devastadora, una caja para deformación intermedia y la caja final que termina el proceso de deformación con la forma deseada. En los extremos se dispone de guías que permiten la correcta introducción del material a la canaleta deseada y bobinadores que permiten reintroducir el

material al canal como se muestra en la siguiente figura 2.6 los tipos de laminadores (Metalúrgica mecánica, Dieter y George E., 1967, p. 526).

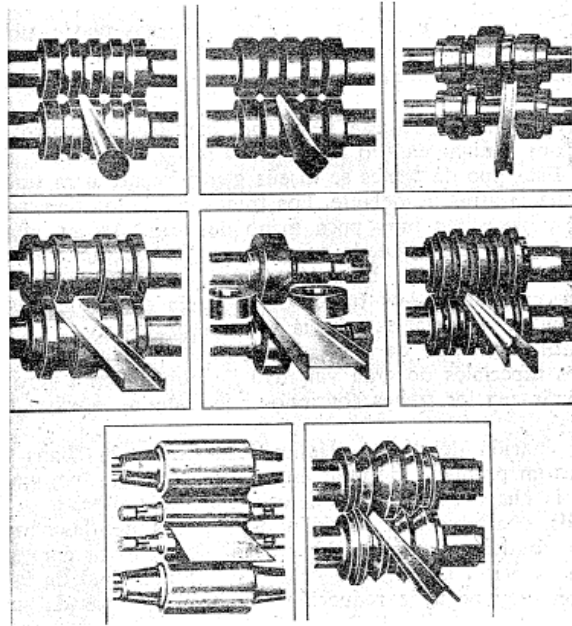


Ilustración 2.7 Cilindros para perfiles y canaletas. Fuente: Metalúrgica mecánica. Dieter y George E.

2.4 MICROESTRUCTURA

En la solidificación de los metales fundidos, los átomos tienden a ordenarse entre sí en diversas configuraciones, a estas se les llama cristales. Al conjunto más pequeño de átomos que muestra las características de la estructura de red en un metal se conoce como celda unitaria. Cuando las celdas unitarias se repiten dentro de la red se conocen como redes cristalinas y en la figura 2.7 a) se puede apreciar que los átomos tienen un mismo orden. En la figura 2.7 b) los átomos no tienen un orden secuencial y a estas redes se conocen como redes no cristalinas.

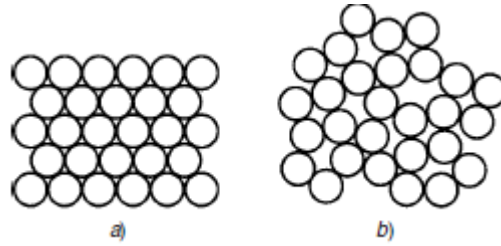


Ilustración 2.8: Tipos de redes cristalinas. a) Red cristalina b) Red no cristalina. Fuente: Fundamentos de la manufactura moderna

Los modelos de bolas o de esferas son representaciones de estructuras, cada esfera representa un átomo. Los arreglos básicos de los metales son: estructura centrada en el cuerpo (bcc), estructura centrada en las caras (fcc) y las estructuras hexagonales compactas (hcp). En las estructuras bcc cada átomo tiene a su alrededor ocho átomos como se puede apreciar en la figura 2.8 a). Las estructuras con mayores densidades son las fcc y las hcp, en la figura 2.8 b) y 2.8 c) se puede apreciar una mayor cantidad de átomos en la misma estructura. Las propiedades de un metal están basadas en los arreglos que se hacen entre los átomos. Al momento de adicionar un átomo este se conoce como aleante, se realiza con frecuencia para mejorar las propiedades del metal (Manufactura, Ingeniería y Tecnología, Sereope Schmid y Steven Kalpakijan, 2008, p. 50).

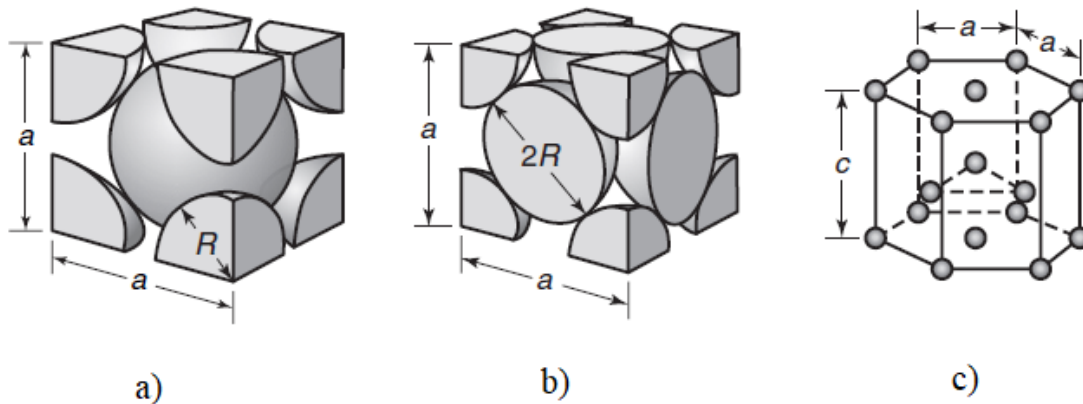


Ilustración 2.9 Modelos de esferas. Fuente: Manufactura, Ingeniería y Tecnología. Sereope Schmid y Steven Kalpakijan

2.4.1 Deformación en cristales metálicos

Los metales tienen redes cristalinas que los transforman en materiales rígidos, difíciles de doblar y tienen una forma definida. Al momento de aplicar una fuerza mecánica de manera incremental, la primera respuesta es de manera elástica, alargando la estructura sin que haya cambios en la posición de los átomos en la red una vez quitando la fuerza mecánica, en la figura 2.9 a) se puede apreciar la deformación elástica. Si la fuerza alcanza un valor alto en relación con las fuerzas electrostáticas que mantienen unidos a los átomos entre sí, se genera un cambio permanente que es llamado deformación plástica pudiéndose observar en la figura 2.9 b). Lo que sucede realmente es que los átomos en la red se han movido de manera permanente de las posiciones que ocupaban inicialmente, se ha establecido un nuevo equilibrio en la red. A este fenómeno de movimiento es conocido como deslizamiento e implica a los átomos en los lados opuestos de la red. El deslizamiento entre un plano de átomos sobre un plano adyacente se conoce como plano de deslizamiento. Se producen por los esfuerzos cortantes, mientras que los esfuerzos cortantes se definen como la relación entre la fuerza y el área transversal que se desplaza. A la combinación entre un plano y dirección de deslizamiento se denomina sistema de deslizamiento (Manufactura, Ingeniería y Tecnología, Sereope Schmid y Steven Kalpakijan, 2008, p. 48).

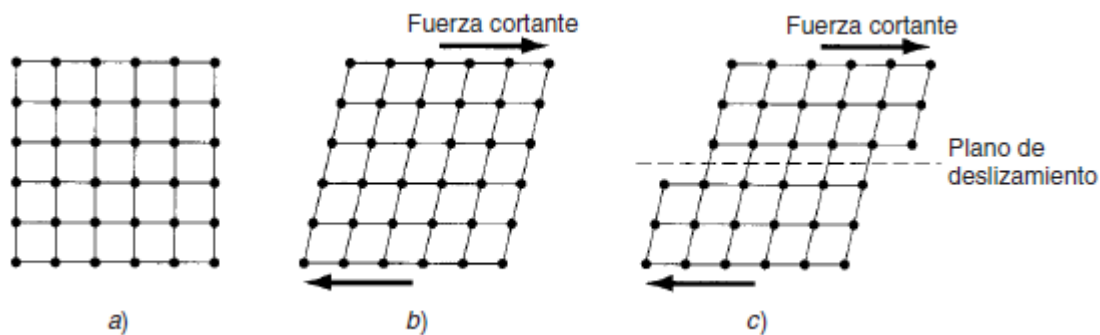


Ilustración 2.10 Tipos de deformaciones. Fuente: Mecánica de materiales. Russel C. Hibbler.

En los sistemas de deslizamientos son dependientes del tipo de red que tenga el material, existen en los metales los bcc, hcp y fcc. Los sistemas de deslizamientos más compactos son los que permiten una mayor facilidad de deformación siendo los hcp y los fcc los más compactos. Hay defectos naturales dentro de la red que se conocen como dislocaciones. Afectan a la red cristalina a una fila de átomos dentro de la red. En general se pueden mover en diferentes sistemas de

deslizamientos. La selección del plano y la dirección no son arbitrarias, por lo tanto, el grado de facilidad de deslizamiento vendrá determinado por la estructura de la red y la fuerza a la que sea sometido.

2.5 VARIABLES EN LA LAMINACIÓN

Las variables que interfieren en la laminación se presentan en la figura 2.9, son las condiciones de diseño que interfieren en el laminador.

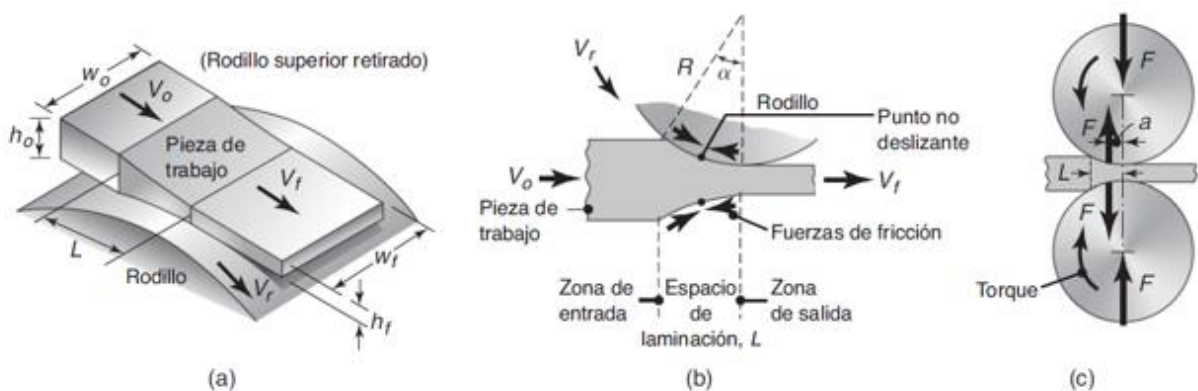


Ilustración 2.11 Factores principales de la laminación. Fuente: Manufactura, Ingeniería y Tecnología. Sereope Schmid y Steven Kalpakijan

La teoría de los laminadores está desarrollada para el conformado de planchas, y el desarrollo de esta memoria es un laminador de alambrones y probetas. Para poder aplicar la teoría se deben crear estimaciones que se basan en la laminación plana en donde para lograr entender estas consideraciones se debe tener el fundamento de la laminación plana. En la imagen 2.11 a) se muestra un esquema del proceso de laminación plana. Una plancha metálica de espesor inicial h_0 entra al espacio de laminación y un par de rodillos la reduce a un espesor h_f . La velocidad tangencial de los rodillos es V_r . La velocidad del material aumenta de su valor de entrada V_0 conforme se mueve a través del espacio de laminación, de la misma manera en que un fluido incompresible debe fluir más rápidamente cuando pasa a través de un canal convergente. La velocidad del material es mayor a la salida y se denota con V_f . El ancho del material se mantiene constante por lo que $W_0 = W_f$. Como la velocidad de la superficie del rodillo es constante, existe un deslizamiento relativo entre el rodillo y el material a lo largo del

arco de contacto en el espacio de laminación y se denota con L_p . Los rodillos jalan al material hacia el espacio de laminación por medio de una fuerza de fricción neta como se muestra en la figura 2.9 b), esta fuerza debe ser lo suficientemente mayor para que el material mantenga el transcurso en el espacio de laminación. Los rodillos aplican presión sobre el material para reducir el espesor, lo que produce una fuerza vertical de aplastamiento F como se muestra en la figura 2.9 c). La fuerza se aplica a la mitad de la proyección de contacto, mientras que el torque es la fuerza de laminación por la mitad de la longitud de contacto.

2.5.1 Relación de volúmenes en unidad de tiempo

Al ingresar el material en volúmenes por unidad de tiempo, este debe ser igual al de salida. Por lo tanto, de esta observación se puede deducir la siguiente ecuación:

(4)

$$bh_0v_o = bh_fv_f$$

Donde:

- b : ancho del material
- h_0 : espesor inicial del material
- v_o : velocidad inicial del material
- h_f : espesor final del material
- v_f : velocidad a la salida de la laminación

El ancho permanece constante por lo que se puede simplificar para encontrar la velocidad de ingreso o salida del material.

2.5.2 Espacio de laminación

El espacio donde se produce la laminación es la proyección de la longitud del arco de contacto y la forma de calcularlo es con la ecuación 5 y es mostrada en la figura 2.11 b). La distancia de aplicación de la fuerza es una estimación.

(5)

$$L_p = [R(h_0 - h_f)]^{1/2}$$

Donde:

L_p : proyección de longitud de contacto

2.5.3 Ángulo de laminación

En la figura 2.9 b) se puede apreciar que existe un ángulo de laminación, que es igual a la proyección horizontal del arco de contacto dividido por el diámetro del cilindro como se presenta en la ecuación 5 en formato de diámetro o radio del cilindro.

(6)

$$\text{sen}(\alpha) = \frac{[R(h_0 - h_f)]^{1/2}}{R} = \left[\frac{2(h_0 - h_f)}{D} \right]^{1/2}$$

Donde:

R : radio del rodillo

D : diámetro del rodillo

h : diferencia de espesores del material al inicio y al final

2.5.4 Fuerza de laminación y torque

Es la fuerza con que los cilindros comprimen entre sí al metal; es igual a la fuerza con que el metal actúa sobre los cilindros intentando separarlos. La presión que ejerce el cilindro sobre el material es igual a la fuerza de laminación dividida por la superficie de contacto como se presenta en la siguiente ecuación, no siendo constante a lo largo de la superficie de contacto entre el material y el rodillo:

(7)

$$\rho = \frac{F}{b * L_p}$$

Donde:

ρ : presión específica de laminación, es el esfuerzo de compresión sigma.

F : fuerza de laminación

b : ancho del material

L_p : longitud del arco de contacto

Capítulo 2. Marco Teórico

De la ecuación 7 se puede decir que el arco de contacto depende del ángulo de laminación que en la figura 2.9 b) es presentado con α . Por lo tanto, despejando la fuerza F queda como la integral de la presión específica a lo largo del arco de contacto presentado en la siguiente ecuación 8:

(8)

$$F = Rb \int_0^{\theta=\alpha} \rho d\theta$$

Donde:

b : ancho de la chapa

α : ángulo de laminación.

De los métodos semiempíricos, la fórmula de Ekelund no es solamente la más antigua, sino también la más conocida y, sobre todo la que da resultados relativamente más exactos (Metalurgia de los metales no ferrosos, Linchevski, 1983, p. 296. La fórmula para el cálculo de la presión de laminación en productos planos es la siguiente:

(9)

$$F = \sigma_o' b \sqrt{R((h_0 - h_f))} \left[1 + \frac{1.6f \sqrt{R(h_0 - h_f)} - 1.2(h_0 - h_f)}{h_0 + h_f} \right]$$

Donde:

σ_o' : esfuerzo de laminación de planos

f : coeficiente de fricción

El torque de laminación es igual a la carga total de laminación multiplicada por el brazo equivalente del momento a , y como hay dos cilindros (Metalúrgica mecánica, Dieter y George E., 1967, p. 546), está dado por:

(10)

$$T = 2 * F * a$$

Donde

Capítulo 2. Marco Teórico

F : fuerza de laminación

a : brazo equivalente

La fuerza de laminación se produce a lo largo de la longitud de proyección siendo de poca magnitud como el radio del rodillo es superior a los espesores, para simplificar los cálculos se determina a la mitad obteniendo la siguiente ecuación:

(11)

$$L_p = 2a$$

2.5.5 Esfuerzo en rango plástico

Es el valor instantáneo del esfuerzo requerido para proseguir con la deformación del material y mantenga fluyendo al metal. Es la resistencia a la fluencia del metal en función de la deformación, que se expresa como la ecuación de Hollomon (ecuación 2) y ahora presentado en la ecuación 12.

(12)

$$S_y = K * \epsilon^n$$

Donde:

S_y : esfuerzo en rango plástico

K : coeficiente de endurecimiento

n : exponente de endurecimiento

ϵ : deformación

El esfuerzo para utilizar en esta memoria es el esfuerzo promedio en rango plástico ya que existe deformación desde que entra hasta que sale del laminador. Se calcula integrando la ecuación de la curva de fluencia ecuación 11, entre cero y el valor final de la deformación que define el rango de interés (Fundamentos de la manufactura moderna, Grover M.P, p. 382), obteniendo la siguiente ecuación:

$$\int K\varepsilon^n d\varepsilon$$

(13)

$$\bar{S}_y = \frac{K\varepsilon^n}{1+n}$$

Donde:

\bar{S}_y : esfuerzo promedio en rango plástico del material

Los valores característicos a temperatura ambiente del coeficiente de endurecimiento y exponente de endurecimiento son presentados en la siguiente tabla 2.2:

Tabla 2.2 Valores característicos a temperatura ambiente. Fuente: Manufactura, Ingeniería y Tecnología. Sereope Schmid y Steven Kalpakijan.

Valores característicos para K y n a temperatura ambiente		
Material	K (Mpa)	n
Aluminio		
1100-O	180	0.20
2024-T4	690	0.16
6061-O	205	0.20
6061-T6	410	0.05
7075-O	400	0.17
Latón		
70-30, recocido	900	0.49
85-15, laminado en frío	580	0.34
Aleación con base cobalto, tratado térmicamente	2070	0.50
Cobre recocido	315	0.54

Acero		
Bajo carbono recocido	530	0.26
4135 recocido	1015	0.17
4135 laminado en frío	1100	0.14
4340 recocido	640	0.15
Inoxidable 304 recocido	1275	0.45
Inoxidable 410 recocido	960	0.10

2.5.6 Relación entre esfuerzos de fluencia medio y esfuerzo de laminación de planos

En una situación uniaxial, la fluencia ocurre cuando $\sigma \geq S_y$. Para el caso estado de esfuerzos triaxial, el lado izquierdo puede considerarse como un esfuerzo sencillo, equivalente o efectivo del estado general de esfuerzo dado por σ_1 , σ_2 y σ_3 (esfuerzos principales). Por lo general, este esfuerzo equivalente se llama esfuerzo de Von Mises, σ' (Diseño de ingeniería Mecánica de Shigley, McGraw Hill, p. 215). Así la ecuación de fluencia puede escribirse como:

(14)

$$\sigma' \geq S_y$$

Donde el esfuerzo de Von Mises es:

(15)

$$\sigma' = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Reemplazando 13 en 14 se tiene:

$$\left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \geq S_y$$

(16)

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \geq 2 * S_y^2$$

Donde:

$$S_y = \sigma' (\text{esfuerzo en región plástica})$$

Capítulo 2. Marco Teórico

Partiendo de la consideración que no existe ensanchamiento en productos planos, entonces: $\varepsilon_2 = 0$

La deformación es plástica, pero de manera representativa se considera la ley de Hook, para el desarrollo, se tiene

(17)

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E} |\sigma_2 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3)| = 0$$

De donde:

(18)

$$\sigma_2 = \nu(\sigma_1 + \sigma_3)$$

El coeficiente de Poisson para deformación elástica pura es una constante $\nu = 0.3$; en caso de deformación plástica pura y suponiendo que el volumen del material es constante, el coeficiente de Poisson alcanza un valor máximo de $\nu = 0.5$. Al superar el límite de elasticidad, se observa un mayor o menor grado de endurecimiento mecánico además de deformación plástica, por lo que el coeficiente de Poisson pasa de 0,3 a 0,5 (Metalúrgica mecánica, Dieter y George E., 1967, p. 526).

Sustituyendo el valor del coeficiente de Poisson en la ecuación 17 se tiene:

19)

$$\sigma_2 = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)$$

Por lo tanto, se puede decir que en la dirección cuya deformación normal es nula, la tensión es igual a la semisuma de las otras dos. Reemplazando la ecuación 18 en 15 se obtiene:

$$[\sigma_2 - \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)]^2 + [\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) - \sigma_3]^2 + [\sigma_3 - \sigma_1]^2 \geq 2\sigma_0^2$$

$$\frac{6}{4}[\sigma_1 - \sigma_3]^2 \geq 2\sigma_0^2$$

(20)

$$[\sigma_1 - \sigma_3] \geq \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_0$$

Al valor $\frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_0$ se lo conoce como el límite elástico en deformación plana $\sigma\sigma'$, y es igual al valor del esfuerzo de fluencia σ_0 obtenido mediante el ensayo de tensión uniaxial multiplicado por 1,15, es decir:

(21)

$$\sigma\sigma' = 1.15\sigma_0$$

Por otra parte, el valor σ_1 representa la tensión aplicada al material durante el proceso de laminación, mientras que σ_3 representa la presión unitaria que actúa sobre los rodillos.

2.5.7 Fricción durante el laminado

La forma en que el rodillo agarra al material es mediante la fuerza de fricción, por lo tanto, el laminado es realizable solo siendo suficiente la fuerza de roce. Cuando la fuerza de fricción es alta, más grande debe ser la carga de laminación, aumenta el ensanchamiento lateral y el agrietamiento de los bordes. Si, en cambio, la fricción es muy baja, como ocurre en la laminación en frío con cilindros pulimentados y buena lubricación, puede resultar difícil alimentar los laminadores con el material por falta de mordido (Metalúrgica mecánica, Dieter y George E., 1967, p. 532). En la siguiente tabla se entregan los valores aproximados del coeficiente de rozamiento para laminado en frío:

Tabla 2.3 Coeficiente de roce en laminado en frío. Fuente: Manufactura, Ingeniería y Tecnología. Sereope Schmid y Steven Kalpakijan

Material para laminar	Rodillo de laminación	f
Acero al carbono	Acero pulido- lubricado	0.04 – 0.05
Acero al carbono	Acero pulido- inmersión	0.05 - 0.10
Acero al carbono	Acero rugoso (sand blast)	0.3
Aluminio, cobre y plomo	Acero pulido	0.1
Aluminio, cobre y plomo	Acero rugoso	0.4

2.5.8 Temperatura en el laminado de metales

La curva de fluencia es una representación del comportamiento esfuerzo-deformación del metal durante la deformación plástica. Para cualquier metal la curva se ve afectada por la temperatura aumentando o disminuyendo su pendiente, simplificando la cantidad de esfuerzo necesario para deformar. La resistencia se reduce a altas temperaturas ya que los átomos se encuentran excitados, respondiendo a cualquier estímulo de movimiento más fácil. Estos cambios son importantes porque para cualquier operación de deformación con temperatura elevada se requiere menor fuerza y potencias menores. Aplicando el concepto de temperatura en el laminado se puede obtener dos tipos de laminación:

Laminado en frío: Este se realiza a temperatura ambiente o ligeramente arriba. Las ventajas son significativas ya que se proporciona una mejor precisión obteniendo tolerancias más estrechas, mejoran el acabado superficial del material, el endurecimiento por deformación aumenta la resistencia y la dureza de la pieza. Una consideración no menos importante es el ahorro de costos de energía y combustible en el proceso. Como el acabado es más prolijo entrega una disminución en el acabado superficial. Ahora mencionando las desventajas del laminado en frío es que se requieren mayores potencias y fuerzas para desempeñar el laminado, se debe asegurar que las superficies de la pieza no contengan impurezas que al finalizar el proceso queden incrustado en la pieza y la ductilidad y el endurecimiento por deformación limitan la cantidad de formado que se puede hacer sobre esta (Manufactura, Ingeniería y Tecnología, Sereope Schmid y Steven Kalpakijan, 2008, p. 347).

Laminado en caliente: En este caso se realiza la deformación por encima de la temperatura de recristalización. La temperatura de recristalización de un metal es aproximadamente la mitad de su punto de fusión, aquí el material se encuentra muy maleable para deformar. La ventaja más significativa es que las deformaciones que se pueden lograr son de mayor capacidad aplicando la misma fuerza y potencia. Cuando se aplica en caliente no incrementa el endurecimiento de la pieza. Ahora considerando las desventajas que se obtienen al laminar en caliente se pueden mencionar: la precisión dimensional es más baja, se requiere de mayor energía térmica para deformar, se crea oxidación en la superficie de trabajo y menor acabado superficial que a la larga se reduce en menor duración de la vida del material.

La recristalización es el proceso de formación de nuevos granos que crean un núcleo y crecen hasta reemplazar a los originales consumiéndolos totalmente. Este proceso se logra calentando el metal y la temperatura aproximada de los aluminios va entre los 680 a 700 grados Celsius. Las operaciones de laminado en caliente se hacen de manera que no dejen tiempo suficiente para que se complete la recristalización de la estructura granular, al final de igual manera se completa ya sea una vez terminado el laminado en caliente o más tarde, al enfriarse la pieza (Metalúrgica mecánica, Dieter y George E., 1967, p. 485).

2.6 ALUMINIO Y ALEACIONES

El aluminio como el magnesio son metales ligeros y por esta característica es frecuente que se utilicen en aplicaciones de ingeniería. El aluminio es extraído de la tierra y el magnesio del mar, siendo ambos de difícil extracción (Fundamentos de manufactura moderna: Materiales, procesos y sistemas, Groover y Mikell P., 1997, p. 112).

2.6.1 Aleaciones de aluminio

El aluminio tiene una alta conductividad eléctrica y térmica, y la resistencia a la corrosión que tiene es excelente debido a la formación de una película superficial de óxido, delgada y dura. Es un material muy dúctil que adquiere de manera fácil la forma deseada. Tiene resistencia relativamente baja, pero se puede alea y tratar térmicamente para mejorar sus propiedades mecánicas. Estos tratamientos son requeridos cuando se compite con otro metal que se requieren de sus propiedades, pero el aluminio destaca por su bajo peso específico siendo el preferido en estas situaciones. Los diferentes materiales agregados al aluminio cambian sus propiedades mecánicas, dependiendo de lo que se requiere finalmente. Las aleaciones se designan con un número de cuatro dígitos de acuerdo con el sistema adoptado por la Aluminium Association. El primer dígito indica el tipo de aleación según la tabla siguiente:

Tabla 2.4 Aleaciones de aluminio. Fuente: Elaboración propia

Número grupo de aleación	Aleación
--------------------------	----------

Capítulo 2. Marco Teórico

1xxx	Aluminio puro ($Al \geq 99\%$)
2xxx	Al-Cu
3xxx	Al-Mn
4xxx	Al-Si
5xxx	Al-Mg
6xxx	Al-Mg-Si
7xxx	Al-Zn
8xxx	Al-Fe-Si

Además, se suele acompañar estos cuatros dígitos una letra y un número que especifica mejor al material. En la tabla siguiente se especifica los tratamientos realizados al material:

Tabla 2.5 Designación de los tratamientos térmicos. Fuente: Ingeniería, Consultoría y Formación, Ingemecánica.

Letra	Tratamiento al material
O1	Recocido a elevada temperatura y enfriamiento lento
O2	Sometido a tratamiento termomecánico
O3	Homogenizado, aplicado a alambrones y bandas de colada continua
H1	Endurecido por deformación hasta obtener el nivel deseado y sin tratamiento posterior
H2	Endurecido en exceso por deformación y recocido parcial para recuperar suavidad
H3	Acritud y estabilizado
H4	Acritud y lacado o pintado
T1	Enfriado en desde un proceso de fabricación realizado a una elevada temperatura y envejecido de forma natural
T2	Enfriado desde un proceso de fabricación realizado a una alta temperatura, trabajado en frío y envejecido de forma natural
T3	Solución tratada térmicamente, trabajada en frío y envejecido hasta alcanzar una condición estable

Capítulo 2. Marco Teórico

T4	Solución tratada térmicamente y envejecida hasta alcanzar una condición estable. Parecido al T3, pero sin el trabajo en frío
T5	Enfriado desde un proceso de fabricación a alta temperatura y envejecido artificialmente
T6	Solución tratada térmicamente y envejecida artificialmente. Producto conformado a alta temperatura (moldeo o extrusión).
T7	Solución tratada térmicamente y envejecida para su completa estabilización
T8	Térmicamente tratada por disolución, trabajado en frío y envejecida artificialmente
T9	Solución tratada térmicamente, envejecida artificialmente y trabajada en frío
T10	Enfriado desde un proceso de fabricación realizado a alta temperatura, trabajado en frío y envejecido artificialmente hasta su condición sustentable
F	Aleación en estado bruto
W	Solución tratada térmicamente. Aplicado a materiales que después de recibir un tratamiento térmico quedan con una estructura inestable y sufren envejecimiento natural.

Las propiedades mecánicas de los aluminios utilizados en esta memoria son los siguientes:

Tabla 2.6 Propiedades de los aluminios utilizados en la memoria. Fuente: extraído el 12 de diciembre de www.matweb.com

Aluminio	Esfuerzo de fluencia (σ_y) (Mpa)	Último esfuerzo de tracción (σ_{ut}) (Mpa)
1100-O	20	90

Capítulo 2. Marco Teórico

2024-T4	290	441
6061-O	48,3	117
6061-T6	255	290
7075-O	96,5	221

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN A LA PROBLEMÁTICA

PROCEDIMIENTO DE LA SOLUCIÓN A LA PROBLEMÁTICA.

Los componentes ya disponibles para el laminador son: los rodillos, los rodamientos de fricción y el motor eléctrico que en la tabla 3.1 se muestran las características. El motor en su extremo ya tiene un reductor de velocidad que ejerce un momento de 583 N.m y una velocidad de 50 rpm . Puede funcionar a 220 volts en circuito estrella y 380 volts en circuito triángulo, siendo necesario en esta ocasión la conexión triángulo que tiene un consumo de $3,6$ amperes.

Tabla 3.1. Propiedades del motor eléctrico. Fuente: Elaboración propia

Propiedades del motor	
Modelo	<i>ZG3 KMRB 80 G. 4</i>
Frecuencia	<i>50 Hz</i>
Voltaje	<i>220/380 V</i>
Amper	<i>6.2/3.6 A</i>
Potencia del motor	<i>1.5 kW</i>
Torque del motor	<i>283 Nm</i>
Velocidad de giro	<i>50 rpm</i>
Masa total del motor	<i>43kg</i>

La procedencia de los rodillos se desconoce, y la fabricación puede variar en: aceros fundidos, aceros forjados o rodillos de carburo wolframio que comúnmente son usados para los rodillos de pequeñas dimensiones. Para el desarrollo de esta memoria se asume que la fabricación es de acero fundido, es decir, el acero se cuela en un molde para ser procesado hasta convertirse en un rodillo. Las dimensiones de los cilindros son presentadas en el anexo 2 plano

1, además de mostrar una fotografía actual en la figura 3.1. Ya teniendo los rodillos dimensionados y los parámetros del motor se comienza a calcular factores equivalentes



Ilustración 3.1 Fotografía del estado actual de los rodillos. Fuente: elaboración propia

3.1 PARÁMETROS EQUIVALENTES

La laminación de chapa es la reducción de espesores manteniendo un ancho constante y en el marco teórico sección 2.5 se muestra en detalle. La laminación aplicada para los rodillos no es plana y el desarrollo en el estado de esfuerzos y deformaciones para laminación de productos no planos es escasa. A continuación, se realizarán estimaciones para lograr aplicar la teoría de laminación plana en la memoria.

3.1.1 Espesores equivalentes

En la laminación plana las cargas de compresión van en sentido del espesor y en la laminación de alambrones son en sentido radial del material (se analizará solamente el caso de reducción de área en elementos circulares). Para efectos de esta memoria, se consideran los espesores como un parámetro equivalente a los diámetros, esto quiere decir que el espesor inicial es igual al diámetro del material al ingreso del laminador y el espesor final es igual al diámetro del material a la salida del laminador. En la siguiente imagen se representan las secciones.

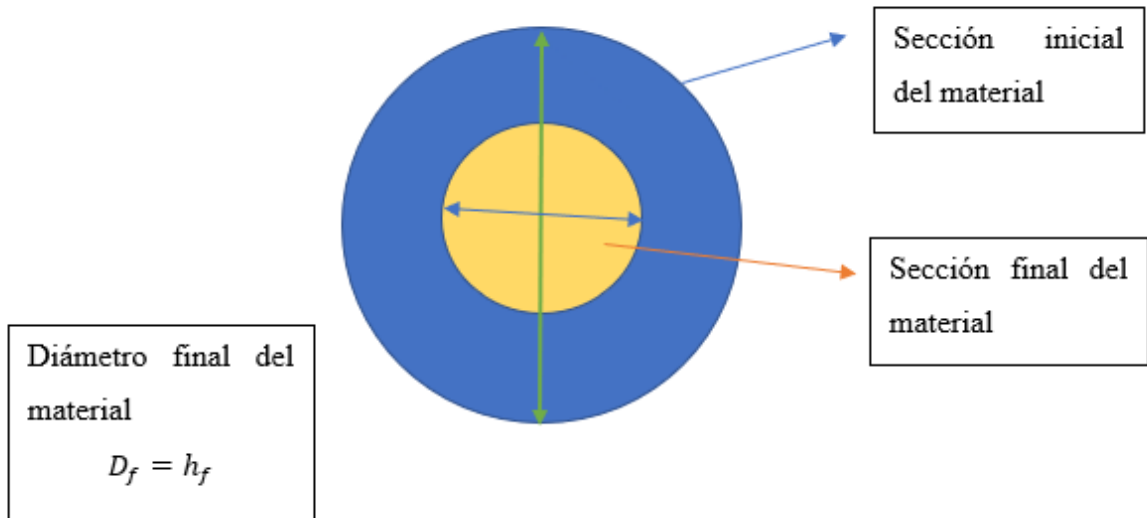


Ilustración 3.2 Diámetros iniciales y finales del material. Fuente: elaboración propia

3.1.2 Fuerza de laminación

La carga de compresión se ejerce desde el rodillo hacia adentro del material de manera radial, en la imagen 3.3 se puede apreciar la situación planteada donde se ve una vista frontal del material a la entrada y salida del laminador.

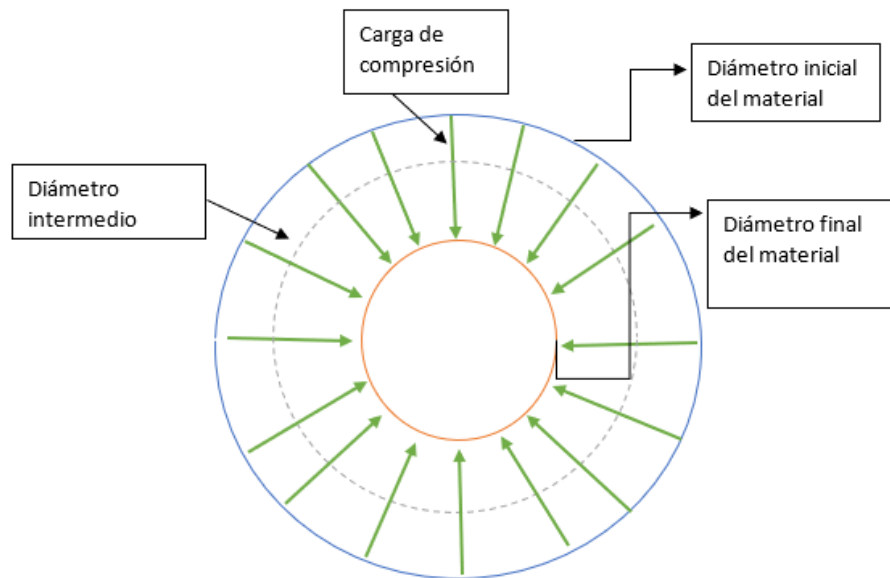


Ilustración 3.3 Laminación de vista frontal en el material. Fuente: elaboración propia

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

El diámetro intermedio mostrado en la figura 3.3 es una estimación que se realiza para poder tener un análisis de la laminación del alambroón. El esfuerzo que produce la carga en la figura 3.3 es igual a la capacidad interna del material para resistir la carga de compresión que en capítulos anteriores se nombró esfuerzo en la región plástica, por lo tanto, se obtiene la siguiente ecuación 23:

(22)

$$\bar{S}_y = \frac{F}{A_p}$$

Donde:

F_c : carga de compresión

A_p : área de aplicación de la carga

Si se analizan las cargas de compresión existentes en la laminación plana se obtiene la siguiente relación infinitesimal:

(23)

$$dF_c = \bar{S}_y dA_p$$

Las cargas de compresión estas se ejercen en una sección del arco en el diámetro intermedio (Ver figura 3.4) y además se aplica perpendicularmente a la longitud de proyección (L_p), en donde se determina el área de aplicación de la carga de compresión obteniendo la ecuación 24:

(24)

$$dA_p = R_p d\theta L_p$$

Donde

dA_p : área de aplicación de la carga

R_p : radio promedio

$d\theta$: grados de aplicación de la fuerza

L_p : longitud de proyección de contacto

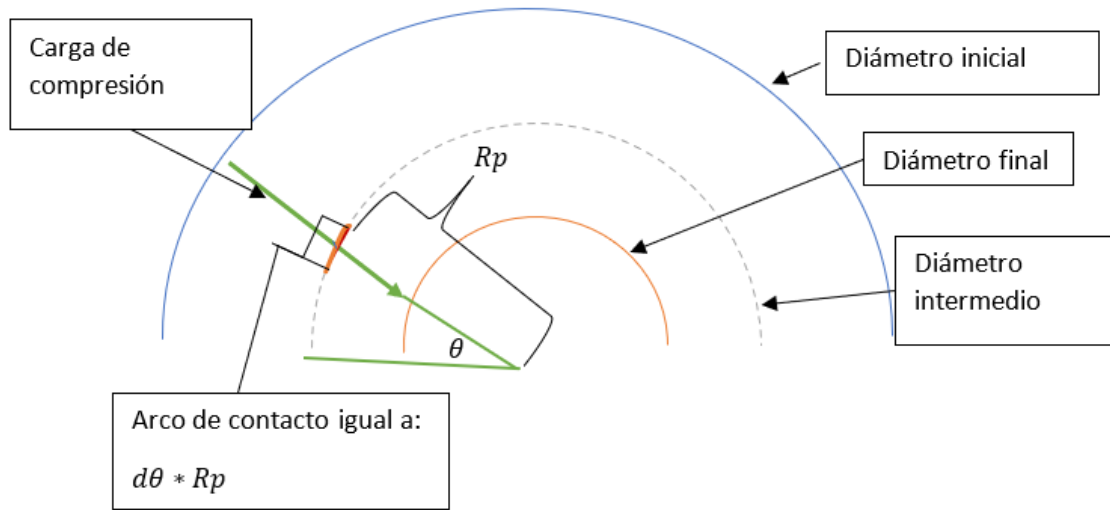


Ilustración 3.4 Área de aplicación de la compresión. Fuente: elaboración propia

Si se analiza una carga de compresión y se descompone en el eje vertical y horizontal se presenta en la figura 3.5:

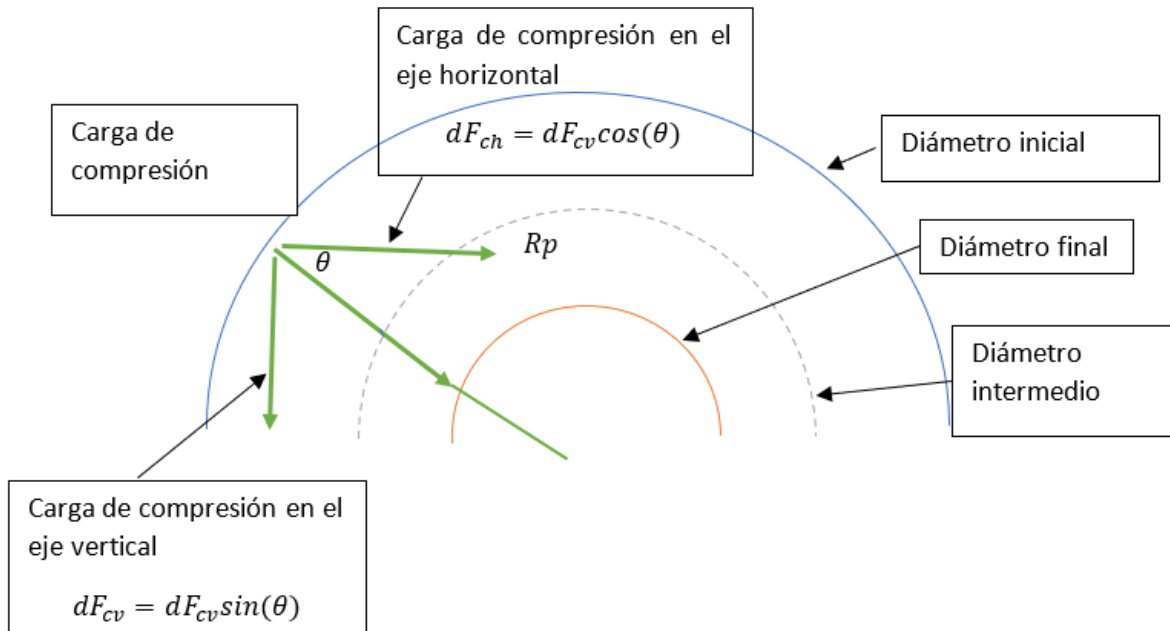


Ilustración 3.5 Descomposición de la carga de compresión. Fuente: elaboración propia

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

En un solo rodillo las cargas horizontales se anulan entre ellas, entonces la única carga de interés para la laminación es la carga del eje vertical que se presenta en la siguiente ecuación:

(25)

$$dF_{cv} = dF_c \sin(\theta)$$

Entonces se puede decir que la fuerza necesaria para el laminador es la siguiente:

$$F = dF_{cv}$$

Ahora reemplazando la ecuación 23 y 24 en 25 se tiene lo siguiente:

(26)

$$F = \overline{S_y} R_p d\theta L_p \sin(\theta)$$

Para la suma de todas las fuerzas de laminación se integra como se presenta en la siguiente ecuación:

$$\int_0^{\pi} \overline{S_y} R_p L_p \sin(\theta) d\theta$$

Resolviendo la suma de todas las cargas de laminación se obtiene que la fuerza de laminación necesaria se calcula con la siguiente fórmula:

(27)

$$F = 2\overline{S_y} R_p L_p$$

3.1.3 Esfuerzo promedio de la región plástica

Para poder caracterizar el material de la tabla 2.2 se seleccionan los siguientes aluminios:

Tabla 3.2 Constantes características de aluminios a temperatura ambiente. Fuente: extraído el 20 de noviembre del 2020, www.matweb.com)

Material	K (Mpa)	n
1100-O	180	0.20
2024-T4	690	0.16
6061-O	205	0.20
6061-T6	410	0.05
7075-O	400	0.17

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

Para calcular el esfuerzo de fluencia promedio se utiliza la ecuación 12, con los aluminios presentados en la tabla 3.2. La deformación real o natural se determina con el área de ingreso y de salida del material. El área final es constante para cada caso estudiado, ya que la muesca de los rodillos permite un diámetro final de 10 mm, 6 mm y 5 mm. La forma de determinar el porcentaje de deformación es con la siguiente ecuación:

(28)

$$\epsilon = \ln \frac{A}{A_0}$$

Donde:

A : área final determinada por la muesca del laminador

A₀ : área inicial del material

La manera de caracterizar cada material es de manera iterativa, en donde el parámetro de entrada es el diámetro inicial variando en 1mm. Cada material es analizado en las tres canaletas del rodillo, la primera entrega como diámetro de salida igual a 5 mm, la segunda canaleta es de 6 mm y la tercera canaleta es de 10 mm. Los parámetros fijos son: radios de los rodillos, constantes de endurecimiento y el factor, el ancho equivalente y el espesor final equivalente. Aplicando las fórmulas de laminación se iteran en Excel para variar los espesores iniciales y finales.

La deformación que alcanza el laminador en la canaleta de 10 mm se acota cuando el trabajo en frío llega al 100%, para poder observar la curva de comportamiento en la deformación, dicha curva se presenta en el gráfico 3.1

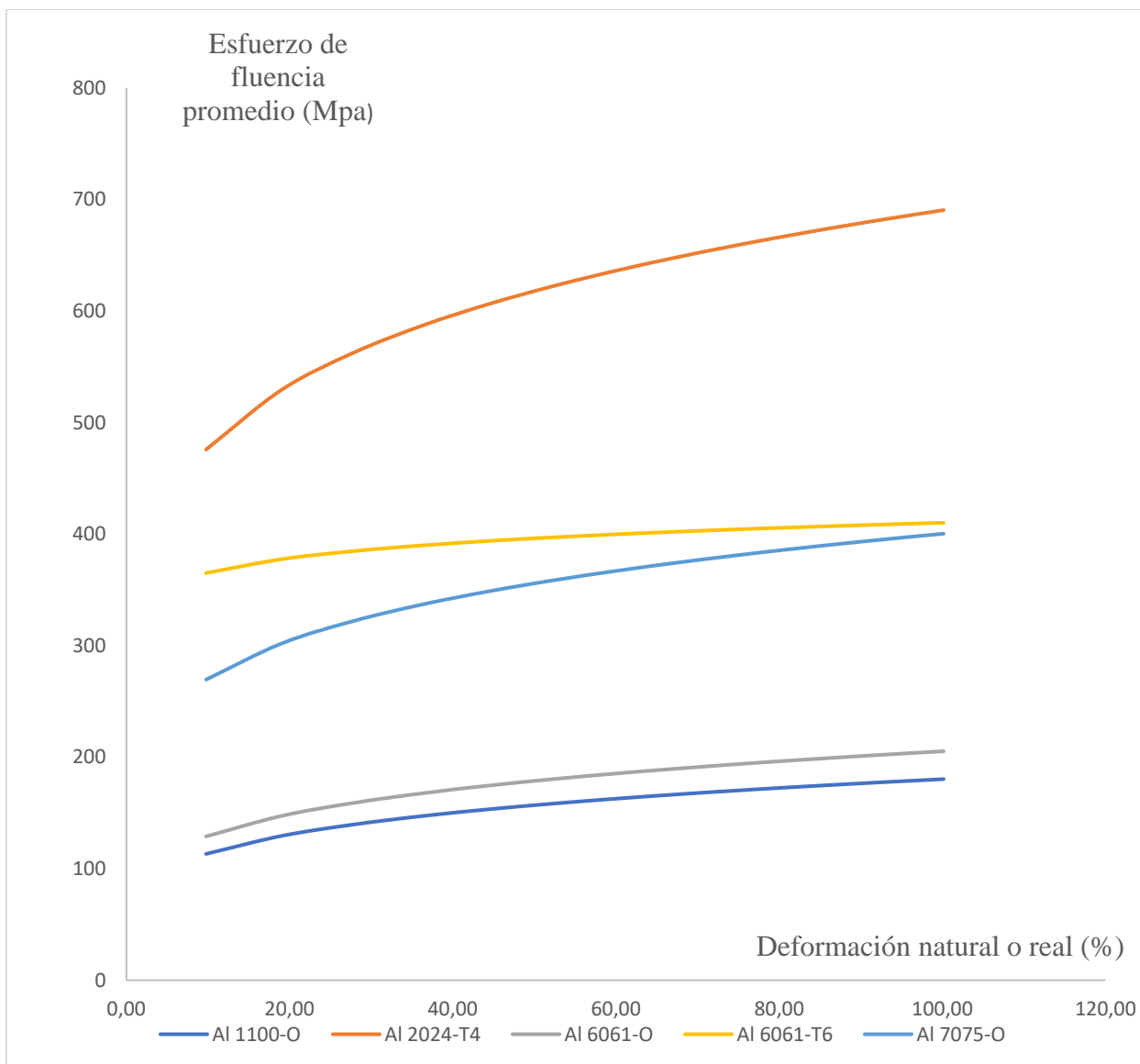


Gráfico 3.1 Esfuerzo de fluencia promedio y deformación necesaria en canaleta de 10 mm.

Fuente: Elaboración propia

En el gráfico se puede apreciar que el material que necesita mayor esfuerzo es el aluminio 2024-T4 que es utilizado comúnmente en la aeronáutica, pero el aluminio de nuestro interés es el 6061-T6 que es utilizado comúnmente en estructuras metálicas. Con el material ya caracterizado y seleccionado es momento de calcular las variables en la laminación y los datos obtenidos se presentan en el anexo 1.

3.2 CÁLCULOS DE VARIABLES EN LA LAMINACIÓN.

3.2.1 Distancias equivalentes.

Se selecciona para deformar el aluminio 6061-T6 que cuando posee un diámetro inicial de 11,5 mm y llega a un diámetro final de 10 mm alcanza un torque de laminación pequeñamente inferior al entregado por el motor. El porcentaje y el esfuerzo de fluencia promedio son presentados en la siguiente tabla 3.3

Tabla 3.3 Resultados obtenidos de la caracterización del material. Fuente: elaboración propia

Variable	Valor	Unidad
Deformación natural	27,95	%
Esfuerzo de fluencia promedio (\overline{S}_y)	384,73	Mpa

Los diámetros son conocidos por la tanto los espesores son iguales a $h_i = 0,01 \text{ m}$ y $h_f = 0,08 \text{ m}$. El radio promedio del material se obtiene con las diferencias de diámetros del material, siendo igual a:

$$R_p = 0,0108 \text{ m}$$

La longitud de proyección de contacto se obtiene con la ecuación 5 obteniendo el siguiente valor:

$$L_p = 0,0077 \text{ m}$$

3.2.2 Cálculo de la fuerza de laminación y torque necesario.

Como ya se obtuvo el esfuerzo de la región plástica en la tabla 3.3, el ancho equivalente, y la proyección de contacto se reemplazan en la ecuación 27 obteniendo la siguiente fuerza de laminación necesaria:

$$F = 35097,76 \text{ N}$$

El torque se obtiene de la ecuación 10 obteniendo el siguiente torque:

$$T = 270,40 \text{ Nm}$$

Al comparar el torque entregado con el motor (ver tabla 3.1) y el de laminación se puede indicar que la deformación del 27.95 % se logra.

3.3 DISEÑO Y SELECCIÓN DE ELEMENTOS EN LA TRANSMISIÓN

El torque y la velocidad de giro obtenidos en la tabla 3.1 son los parámetros para poder dimensionar los elementos en la transmisión de potencia. Se requiere dimensionar los engranes en los rodillos, el sistema de acople del motor a los rodillos y las chavetas que cumplen la función de restringir el giro de los elementos.

3.3.1 Engranes de los rodillos

Los engranes a utilizar son rectos, ya que tienen la mayor eficiencia. Estos pueden funcionar a bajas revoluciones y son capaces de transmitir grandes potencias. El criterio en los engranes es que ambos deben girar a 50 rpm y transmitir un torque de 283 Nm. La fresadora disponible para su fabricación permite un módulo de 2 mm y el ángulo de ataque igual a 20°. En la tabla 3.4 se presentan las características geométricas tentativas de los engranes:

Tabla 3.4 Dimensiones tentativas. Fuente: Elaboración propia.

Módulo m	2 mm
Diámetro primitivo D_p	70 mm
Número de dientes $Z = D_p/m$	35
Altura del pie de diente $h_c = 1.25 * m$	3 mm
Diámetro exterior $D_e = D_p + 2 * m$	74 mm
Diámetro de raíz $D_i = D_p - [1.25 * (2 * m)]$	65 mm
Ancho de cara b	40 mm

El material para fabricar los engranes es con acero AISI 4340 que tiene las siguientes propiedades mecánicas:

Tabla 3.5 Propiedades mecánicas del acero AISI 4340. Fuente: Información recuperado el 20 de octubre del 2020, <http://www.matweb.com/>.

AISI 4340-SAES 4340	
Esfuerzo de fluencia S_y	689 MPa
Resistencia a la tensión S_y	1227 MPa
Dureza HB	363

La fuerza tangencial que actúa sobre cada diente del engrane W_T se obtiene con la siguiente ecuación:

(29)

$$W_T = 2 * \frac{T}{D_p}$$

Obteniendo el siguiente valor, $W_T = 8,08 \text{ kN}$

3.3.2 Esfuerzo de flexión en los engranes

La manera de calcular el esfuerzo de flexión es con la siguiente ecuación 35:

(30)

$$\sigma = W_T * K_0 * K_v * K_s * \left(\frac{K_H * K_B}{b * m * Y_j} \right)$$

Donde:

W_T : fuerza tangencial

K_0 : factor de sobrecarga

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

K_v : factor dinámico

K_s : factor de tamaño

K_H : factor de distribución de carga

K_B : factor de espesor del aro

b : ancho de la cara

m : módulo

Y_j : factor geométrico de resistencia a la flexión

Factor de sobrecarga K_0

Este factor se obtiene con la tabla 3.6:

Tabla 3.6 Tabla de factores de sobrecarga. Fuente: ANSIS/AGMA 2001-DO4 y 2101-D04

Tabla de factores de sobrecarga, K_0			
Máquina impulsada			
Fuente de potencia	Uniforme	Impacto moderado	Impacto pesado
Uniforme	1.00	1.25	1.75
Impacto ligero	1.25	1.50	2.00
Impacto medio	1.50	1.75	2.25

Se considera que la fuente de potencia es uniforme con impacto ligero obteniendo el siguiente valor de $K_0=1.25$.

Factor dinámico K_v

El factor dinámico se calcula con:

(31)

$$K_v = \left(\frac{A + \sqrt{200 * V}}{A} \right)^B$$

Donde:

$$A = 50 + 56(1 - B)$$

$$B = 0.25 * (12 - Q_v)^{2/3}$$

AGMA recomienda $Q_v = 6$ como factor comercial (Diseño de ingeniería Mecánica de Shigley, McGraw Hill), por lo tanto, se obtiene $A = 59.773$ y $B = 0.825$

La manera para obtener la velocidad tangencial de los rodillos con la siguiente ecuación 37:

(32)

$$V = \frac{\pi * D_p * N}{12}$$

Donde:

N : velocidad del giro de los rodillos

Obteniendo la velocidad de giro de los rodillos igual a $V = 0,096 \frac{m}{s}$, entonces el valor del factor dinámico es igual a $K_v = 1,052$

Factor de tamaño K_v

Este factor es determinado por AGMA y lo considera para efectos de cálculos igual a $K_s = 1$

Factor de distribución de carga K_H

Se obtiene con la siguiente ecuación

(33)

$$K_H = 1 + C_{mc} * (C_{pf} * C_{pm} + C_{ma} * C_e)$$

Donde:

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

$$C_{mc} = \begin{cases} 1 & \text{Para dientes sin coronar} \\ 0.8 & \text{Para dientes coronados} \end{cases}$$

$$C_{pf} = \begin{cases} \frac{F}{10d} - 0.025 & F \leq 1 \text{ pulg} \\ \frac{F}{10d} - 0.0375 + 0.0125F & 1 < F \leq 17 \text{ pulg} \\ \frac{F}{10d} - 0.1109 + 0.0207F - 0.000228F^2 & 17 < F \leq 40 \text{ pulg} \end{cases}$$

F =Ancho de la cara

$$C_{mc} = \begin{cases} 1 & \text{Para piñon montado separadamente } \frac{S_1}{S} < 0.175 \\ 1.1 & \text{Para piñon montado separadamente } \frac{S_1}{S} \geq 0.175 \end{cases}$$

$$C_{ma} = A + BF + CF^2$$

Con la siguiente tabla se obtienen los valores de A, B y C

Tabla 3.7 Constantes empíricas A, B y C. Fuente: ANSI/AGMA 2001-D04

Condición	A	B	C
Engranajes abiertos	0.247	0.0167	$-0.765(10^{-4})$
Unidades comerciales, cerradas	0.127	0.0158	$-0.930(10^{-4})$
Unidades de precisión, cerradas	0.0675	0.0128	$-0.926(10^{-4})$

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

Unidades de precisión extrema, cerradas	0.00360	0.0102	-0.822(10 ⁻⁴)
---	---------	--------	---------------------------

$$C_{me} = \begin{cases} 0.8 & \text{Para engranajes ajustados durante el ensamble o si la compatibilidad se mejora mediante lapeado o ambos} \\ 1 & \text{Para todas las otras condiciones} \end{cases}$$

Obteniendo los siguientes valores:

$$C_{pm} = C_{mc} = 1; C_{pf} = 0,032; C_{ma} = 0,158$$

Resultando el factor de distribución $K_H = 1,19$

Factor de espesor del aro K_H

Este factor se obtiene con el gráfico 3.2

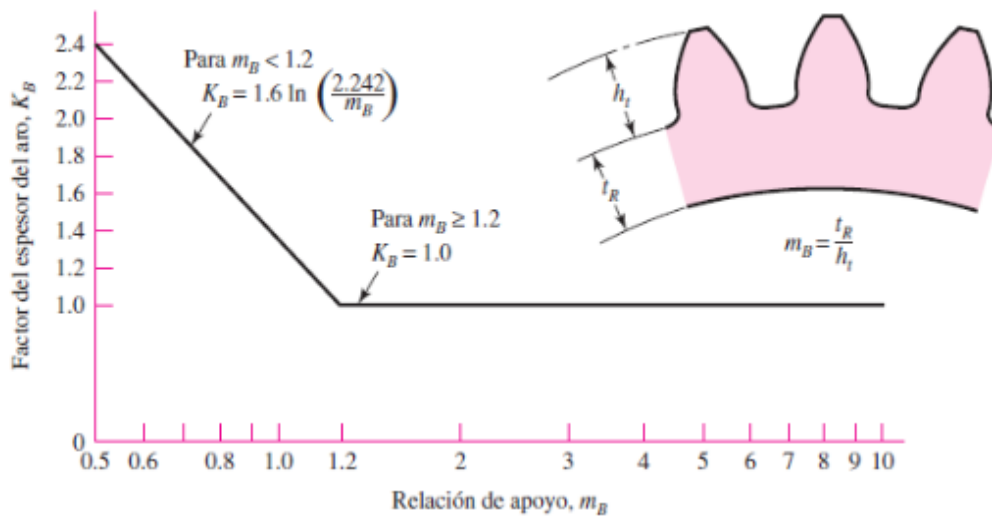


Gráfico 3.2 Factor de espesor del aro. Fuente: ANSI/AGMA 2001-D04

Obteniendo el siguiente valor $K_H = 1$

Factor geométrico de resistencia a la flexión Y_j

La manera de obtener el valor es con el siguiente gráfico 3.3

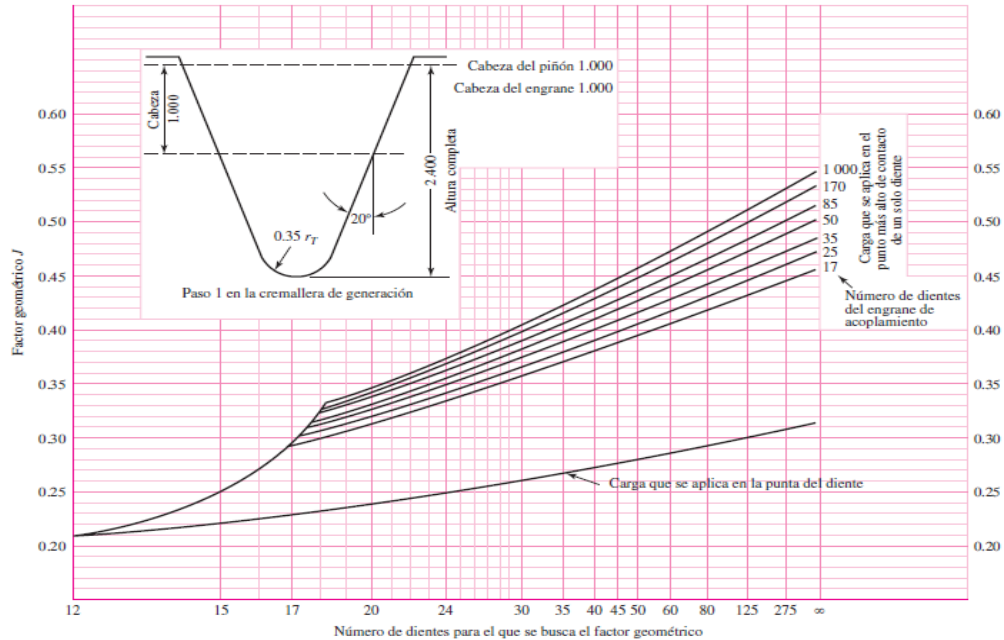


Gráfico 3.3 Factor geométrico de resistencia a la tracción. Fuente: AGMA 218.01

Siendo el valor de $Y_j = 0,38$

Aplicando los valores de los factores se obtiene que el esfuerzo de flexión es de $\sigma = 416 \text{ Mpa}$.

Factor de seguridad en flexión

El esfuerzo de flexión como ya se obtuvo se está en condiciones de calcular el factor de seguridad del engrane, y se determina con la siguiente ecuación 39:

(34)

$$S_F = \frac{S_t * Y_N / (Y_o * Y_Z)}{\sigma}$$

Donde:

S_t : Esfuerzo de flexión permisible

Y_N : Factor de ciclos del esfuerzo de flexión

Y_o : Factor de temperatura

Y_z : Factor de confiabilidad

Esfuerzo de flexión permisible S_t

El esfuerzo de flexión permisible se obtiene con la ecuación 40:

(35)

$$S_t = 0.568 * HB + 83.8 \text{ Mpa}$$

$$S_t = 290 \text{ Mpa}$$

Factor de ciclos de esfuerzo de flexión Y_N

Para un uso moderado durante un tiempo corto el número de ciclos es igual a 10^6 , obteniendo con este dato del gráfico 3.4 el valor de $Y_N = 1.5$

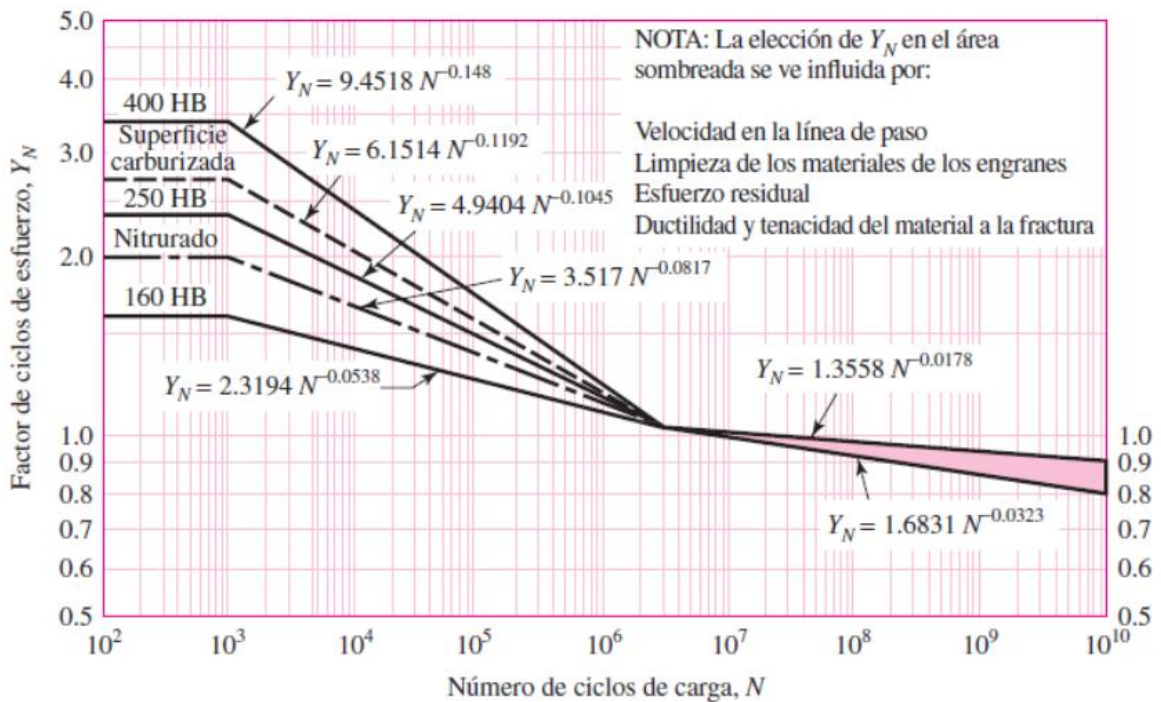


Gráfico 3.4 Factor de ciclos de esfuerzo. Fuente: ANSI/AGMA 2001-D04

Factor de temperatura Y_0

El engrane funcionará a temperatura menor a 120°C, obteniendo el siguiente valor de coeficiente $Y_0 = 1$

Factor de confiabilidad Y_z

Se considera una confiabilidad del 99%, revisando la tabla 3.8 se obtiene un factor de $Y_z = 1$.

Tabla 3.8 Factores de confiabilidad. Fuente: ANSI/AGMA 2001-D04

Confiabilidad	Y_z
0.9999	1.50
0.999	1.25
0.99	1.00
0.90	0.85
0.50	0.70

Como ya se obtienen todos los valores faltantes para determinar el coeficiente de seguridad se obtiene el siguiente coeficiente $S_F = 1.046$, con este valor se puede asegurar que el rodamiento no fallará con esfuerzos de flexión.

3.3.3 Esfuerzo de contacto

El contacto entre engranes es continuo, este quiere decir que los dientes de los engranes hacen contacto uno tras otro. Es necesario revisar que los engranes no fallen debido a alguna picadura u otro defecto de contacto, entonces es necesario calcular el esfuerzo de contacto para luego determinar el factor de seguridad debido al contacto. Con la siguiente ecuación 41 se determina el esfuerzo de contacto:

(36)

$$\sigma_c = Z_E * \sqrt{W_T * K_0 * K_v * K_s * \frac{K_H * Z_R}{D_p * b * Z_I}}$$

Donde:

Z_E : Coeficiente elástico

W_t : Fuerza tangencial

K_0 : Factor de sobrecarga

K_v : Factor dinámico

K_s : Factor de tamaño

K_H : Factor de distribución de carga

Z_R : Factor de condición superficial

D_p : Diámetro primitivo

Z_I : Factor geométrico de resistencia a la picadura

b : Ancho del engrane

Los factores de K_0 , K_v , K_s y K_H mantienen las mismas magnitudes calculadas en el esfuerzo de flexión.

Coeficiente elástico Z_E

La manera de determinar este primer factor es con la siguiente ecuación 42:

(37)

$$Z_E = \left[\frac{1}{\pi * \left(\frac{1 - \nu^2}{E_p} + \frac{1 - \nu_g^2}{E_g} \right)} \right]$$

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

Donde:

E_p : Módulo de elasticidad del piñón

E_g : Módulo de elasticidad de la corona

ν : Coeficiente de Poisson del piñón

ν_g : Coeficiente de Poisson de la corona

De la tabla 3.9 considerando la sección del acero se obtienen los siguientes valores:

$$E_p = 2 * 10^5 \text{ Mpa}; E_p = 191 \text{ Mpa}; \nu = \nu_g = 0.3$$

Tabla 3.9 Coeficiente elástico. Fuente: AGMA 218.01

		Material y módulo de elasticidad de la corona E_g en Mpa					
Material del piñón	Módulo de elasticidad del piñón E_p en Mpa	Acero $2 * 10^5$	Hierro maleable $1,7 * 10^5$	Hierro modular $1,7 * 10^5$	Hierro fundido $1,5 * 10^5$	Bronce aluminio $1,2 * 10^5$	Bronce al estaño $1,1 * 10^5$
Acero	$2 * 10^5$	191	181	179	174	162	158
Hierro maleable	$1,7 * 10^5$	181	174	172	168	158	154
Hierro modular	$1,7 * 10^5$	179	172	170	166	156	152
Hierro fundido	$1,5 * 10^5$	174	168	166	163	154	149

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

Bronce al aluminio	$1,2 * 10^5$	162	158	156	154	145	141
Bronce al estaño	$1,1 * 10^5$	158	154	152	149	141	137

Aplicando los valores obtenidos previamente el coeficiente elástico queda igual a $Z_E = 81.7\sqrt{Mpa}$

Factor de condición superficial Z_R

Como las condiciones superficiales de los dientes de los engranes no se han establecido, entonces, no existe un efecto perjudicial se asume $Z_R = 1$

Factor geométrico de resistencia a la picadura Z_I

La manera de determinar este coeficiente es utilizando la siguiente ecuación:

(38)

$$Z_I = \frac{\cos(\theta) * \sin(\theta)}{2 * m_n} * \frac{m_g}{m_g + 1}$$

Donde:

θ : Ángulo de contacto entre dientes

m_n : Relación de repartición de carga en engranes rectos

m_g : Relación de velocidad entre los engranes

El ángulo de contacto es igual 20° , según las normas AGMA para engranes rectos el valor de $m_n = 1$ y como los engranes giran a la misma velocidad $m_g = 1$. Reemplazando los datos, el valor de $Z_I = 0.08$. Reemplazando los factores obtenidos en la ecuación 32 el esfuerzo de contacto es igual a $\sigma_c = 612 Mpa$

El factor de seguridad de contacto se calcula con la siguiente ecuación:

(39)

$$S_H = \frac{S_C * Z_N * Z_W}{Y_0 * Y_Z \sigma_c}$$

Donde:

S_C : Esfuerzo de contacto permisible

Z_N : Factor de vida de ciclos de esfuerzo

Z_W : Factor de relación de durezas de resistencia a la picadura

Y_0 : Factor de temperatura

Y_Z : Factor de confiabilidad

Esfuerzo de contacto permisible S_C

Este factor se obtiene con la siguiente ecuación 45:

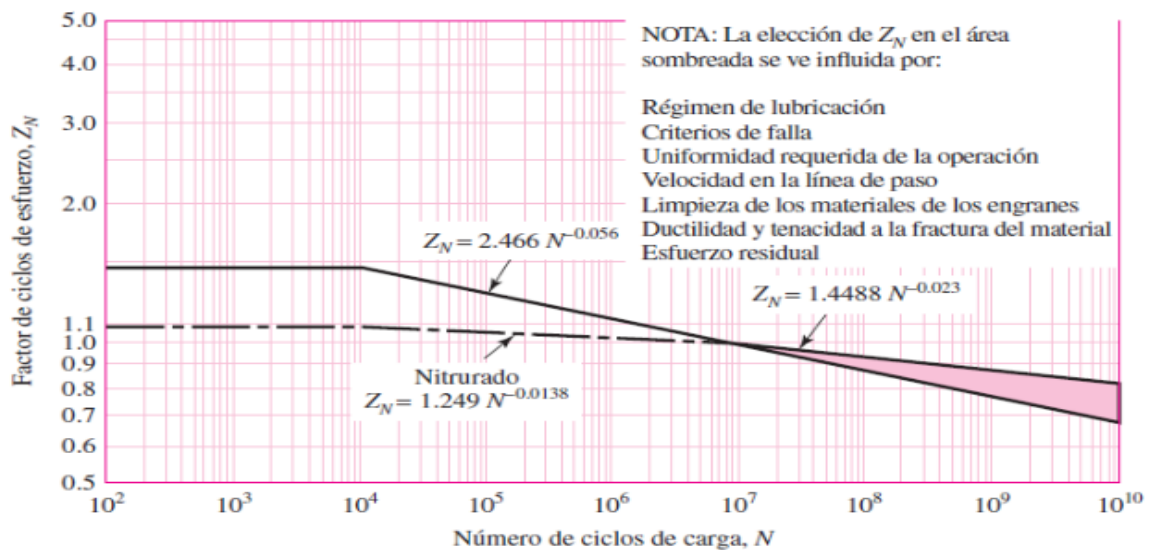
(40)

$$S_C = (2.22 * HB + 200) Mpa$$

$$S_C = 1006 Mpa$$

Factor de vida de ciclos de esfuerzo Z_N

Como ya fue mencionado se considera para un ciclo de vida de 10^6 con el gráfico se



tiene que:

Gráfico 3.5 Factor de ciclos de esfuerzo. Fuente: ANSI/AGMA 2001-DO4

El valor del factor de ciclos de esfuerzo es igual a $Z_N = 1.1$

Factor de relación de durezas de resistencia a la picadura Z_w

Para los engranes con la misma dureza el factor es $Z_w=1$

Factor de confiabilidad Y_z

El diseño del engrane como se mostró en la tabla 3.8 con una confiabilidad del 99%, se tiene: $Y_z = 1$.

Determinando el factor de seguridad con los factores previamente calculados se tiene obtiene que $S_H = 1.806$, por lo tanto, con este factor de seguridad nos indica que los engranes no fallarán en sus superficies de contacto.

3.3.4 Acople en la transmisión.

Para la selección del acople en la transmisión se utiliza el siguiente criterio:

(41)

$$T_{KN} \geq T_{Nmax}$$

Donde:

T_{KN} : torque nominal del acoplamiento

T_{Nmax} : torque máximo de aplicación

Para calcular los torques se utilizan las siguientes ecuaciones 47 y 48:

(42)

$$T_{Nmax} = T_N * F_s$$

Donde:

T_N : torque nominal de aplicación

F_s : factor de servicio

Los factores de seguridad comúnmente utilizado son los siguientes:

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

Tabla 3.10 Factores de seguridad. Fuente: extraído el 10 de noviembre del 2020, <https://www.vulkan.com/es-es/drivetech/Documents/Rigid-Couplings-Technical-Data-ES-PT.pdf>

Maquina accionada	F_s
Agitador de líquido	1,4
Agitador de semilíquidos	1,5
Prensas de moldeo de ladrillos	1,75
Calandras	1,8
Volquetes de autos	1,7
Máquinas centrífugas	1,7
Laminadores en frío	1,75
Laminadores en caliente	2,0
Hormigoneras	1,75

(43)

$$T_N = \frac{P_N * 9550}{n_N}$$

Donde:

P_N : potencia nominal de la aplicación

n_N : velocidad nominal de la aplicación

La potencia nominal de la aplicación es de 1,5 kW con una velocidad de giro de 50 rpm. Reemplazando estos datos en la ecuación 39 se obtiene el siguiente valor $T_N = 286.5 Nm$. El factor de seguridad se obtiene de la tabla 3.10 con un valor de $F_s = 1.75$ obteniendo el torque máximo de aplicación es igual a $T_{Nmax} = 501.375 Nm$. Por catalogo se selecciona el acople de disco con modelo con tamaño 3. Este acople permite un diámetro de eje de 35 mm y un máximo de 119 mm, además soporta un torque nominal de 300 Nm y máxima velocidad de 20000 rpm, con los cálculos previamente realizados este acople cumple con los requisitos.

3.3.5 Chaveta para acople en la transmisión.

Aplicando la norma Din 6885 que es la recomendada por el fabricante del acople, para un diámetro de eje igual a 40 mm, las dimensiones deben ser $b = 12 \text{ mm}$ y $h = 8 \text{ mm}$, se adjunta imagen referencial de las medidas.

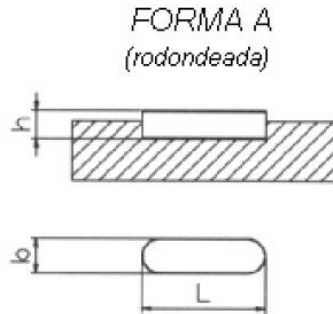


Ilustración 3.6 Dimensiones de las chavetas. Fuente: Normas DIN 6885

El material para la confección de las chavetas es acero ASTM A36, que tiene las siguientes propiedades mecánicas:

Tabla 3.11 Propiedades mecánicas del acero ASTM A36. Fuente: elaboración propia

Material	ASTM A36
Esfuerzo de fluencia (S_y)	250 Mpa
Resistencia última a la tensión (S_{ut})	400-500 Mpa

La dimensión faltante es el largo de la chaveta que se obtiene en primer lugar calculando los esfuerzos cortantes y de aplastamiento. La fuerza aplicada a la chaveta se determina con la siguiente ecuación:

(44)

$$F = \frac{T}{r}$$

Donde:

T : torque que entrega el motor eléctrico

r : radio del eje

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

Se conoce el radio que es igual a $r = 0,015 \text{ m}$ y el torque del motor es igual a $T = 283 \text{ Nm}$, obteniendo una fuerza cortante de $F = 14150 \text{ N}$. Mediante la teoría de la energía de distorsión, la resistencia al cortante es (Diseño de ingeniería Mecánica de Shiggley, McGraw Hill, p. 283):

$$S_{sy} = 0,577S_y = 144,25 \text{ Mpa}$$

La falla por cortante a lo largo del área de la cara de la chaveta creará un esfuerzo de:

$$\tau = \frac{F}{bL}$$

Sustituyendo el esfuerzo cortante por la resistencia dividida entre el factor de seguridad considerado igual a $n = 2$, se tiene:

(45)

$$\frac{S_{sy}}{n} = \frac{F}{bL}$$

Siendo el largo el valor requerido se obtiene $L = 0,016 \text{ m}$, este es el largo mínimo que se puede utilizar en la chaveta. Ahora para resistir el aplastamiento, se utiliza el área de la mitad de la cara de la cuña, obteniendo la siguiente ecuación 51:

(46)

$$\frac{S_y}{n} = \frac{F}{\frac{bL}{2}}$$

Manteniendo un factor de seguridad de $n = 2$, el largo que requiere es de $L = 0,018 \text{ m}$. Por estabilidad la longitud se considera un largo total de $L = 0,04 \text{ m}$.

3.3.6 Chaveta para los engranes

El diámetro del eje es de 30 mm y aplicando nuevamente la norma DIN 6885, las dimensiones de la chaveta son $b = 10 \text{ mm}$ y $h = 8 \text{ mm}$. El material para su fabricación es de ASTM A-36, las propiedades son presentadas en la tabla 3.11. Ahora el torque disminuye a la mitad como se transmite a dos engranes la fuerza es igual a $F = 9433.3 \text{ N}$.

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

Se mantiene el factor de seguridad igual $n = 2$, reemplazando los datos obtenidos previamente en la ecuación 50, queda el largo igual a $L = 0,0013 \text{ m}$.

Para corroborar el largo se calcula con la ecuación 51 que es la de esfuerzo de aplastamiento, siendo igual a $L = 0,009 \text{ m}$. Los engranes tienen un ancho de $0,04 \text{ m}$ por lo tanto para efectos de estabilidad se considera que la chaveta mantenga una longitud de $L = 0,03 \text{ m}$.

3.3.7 Puntos de apoyo para los rodillos

La tendencia en este proyecto son cojinetes de fricción, debido a que resisten potencias y fuerzas dinámicas de elevada magnitud. Además de su fácil montaje con los rodillos en la estructura soportante. Los parámetros de selección es que resista la fuerza de laminación $F = 35097,76 \text{ N}$, para efectos de cálculos se considera que la fuerza aplicada es en el centro de los rodillos, por lo tanto, la fuerza dinámica que deberán resistir es igual a $F_d = 17,55 \text{ kN}$ y el diámetro interior del cojinete de fricción debe ser igual a 40 mm .

Se selecciona del catálogo de cojinetes de la marca SKF, el cojinete con modelo PCM 404440 E que en el anexo 5 se adjunta las dimensiones y propiedades físicas. La manera para determinar la vida nominal básica del cojinete de fricción es con la siguiente ecuación:

(47)

$$G_h = C_1 * C_2 * C_3 * C_4 * C_5 * \left(\frac{K_M}{(p * V)^n} \right)$$

Donde:

- G_h : vida útil de funcionamiento
- C_1 : factor de carga
- C_2 : factor de velocidad
- C_3 : factor de temperatura
- C_4 : factor de rugosidad superficial
- C_5 : factor para el tipo de carga
- K_M : factor según el tipo de material y rodamiento
- p : carga específica de la rótula

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

V : velocidad de deslizamiento

n : exponentes

Para poder a comenzar a determinar los factores es necesario calcular la carga específica de la rótula y se obtiene con la siguiente ecuación:

(48)

$$p = \frac{K * F_d}{C}$$

Donde:

F_d : carga dinámica del rodamiento

K : factor de carga específica

C : capacidad de carga dinámica básica

El valor de la carga dinámica es conocido, mientras el factor de carga específica se obtiene de la ficha técnica del fabricante igual a $K = 80 \text{ N/mm}$ y la capacidad de carga dinámica es igual a $C = 125 \text{ kN}$, por lo tanto, la carga específica de la rótula es $p = 11,232 \text{ N/mm}^2$

La velocidad de deslizamiento se calcula con la siguiente ecuación 54:

(49)

$$V = 5,82 * 10^{-7} * d1 * \beta * f_{-1}$$

Donde:

$d1$: diámetro interior del cojinete

β : mitad del ángulo de oscilación

f_{-1} : velocidad de giro del eje

El diámetro del interior del cojinete es $d1 = 40 \text{ mm}$, la velocidad de giro es $f_{-1} = 50 \text{ rpm}$ y el ángulo de oscilación para un giro es de $\beta = 90^\circ$, obteniendo la siguiente velocidad de deslizamiento $V = 0,104 \text{ m/s}$.

La manera de calcular los factores es la siguiente:

Factor de carga C_1 :

Se obtiene del gráfico 3.6, siendo igual a $C_1 = 1,38$ aproximadamente.

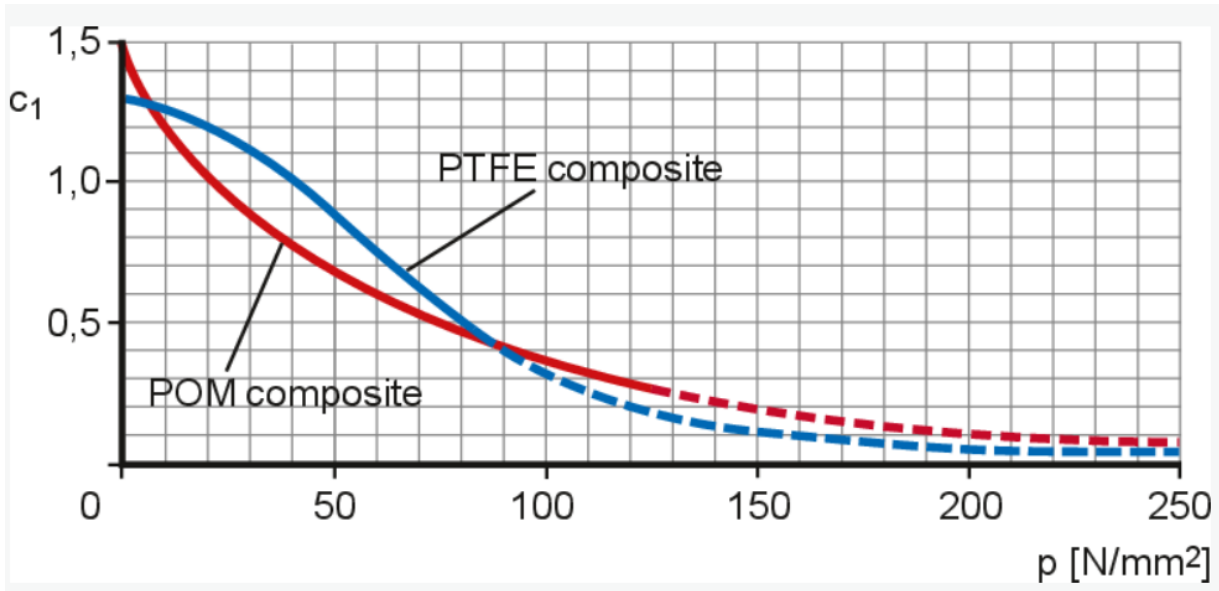


Gráfico 3.6 Factor de carga para materiales de rodamientos de PTFE Y POM. Fuente: extraído el 20 de noviembre del 2020, www.SKF.com

Factor de velocidad C_2 :

El factor de velocidad se obtiene del siguiente gráfico 3.7, que es igual a $C_2 = 1$

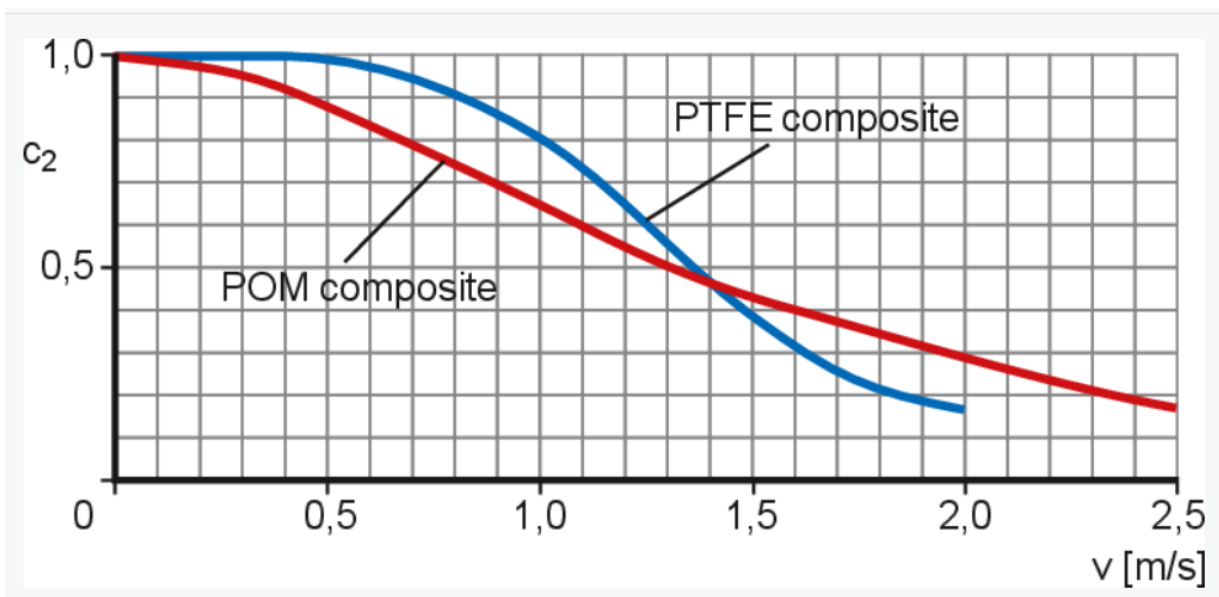


Gráfico 3.7 Factor de velocidad para materiales de rodamientos de PTFE Y POM. Fuente: extraído el 20 de noviembre del 2020, www.SKF.com

Factor de temperatura C_3 :

Se obtiene con el gráfico 3.8 y adquiere un valor aproximado de $C_3 = 1$.

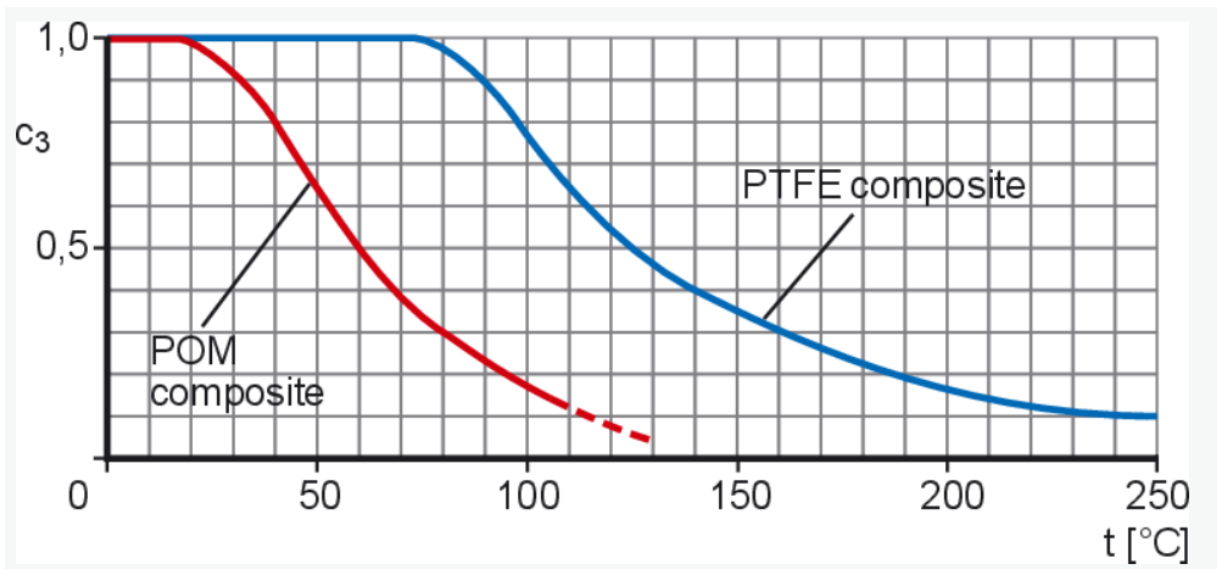


Gráfico 3.8 Factor de temperatura para materiales de rodamientos de PTFE Y POM. Fuente: extraído el 20 de noviembre del 2020, www.SKF.com

Factor de rugosidad superficial C_4 :

El factor de rugosidad es igual a $C_4 = 1$, obtenido del gráfico 3.9.

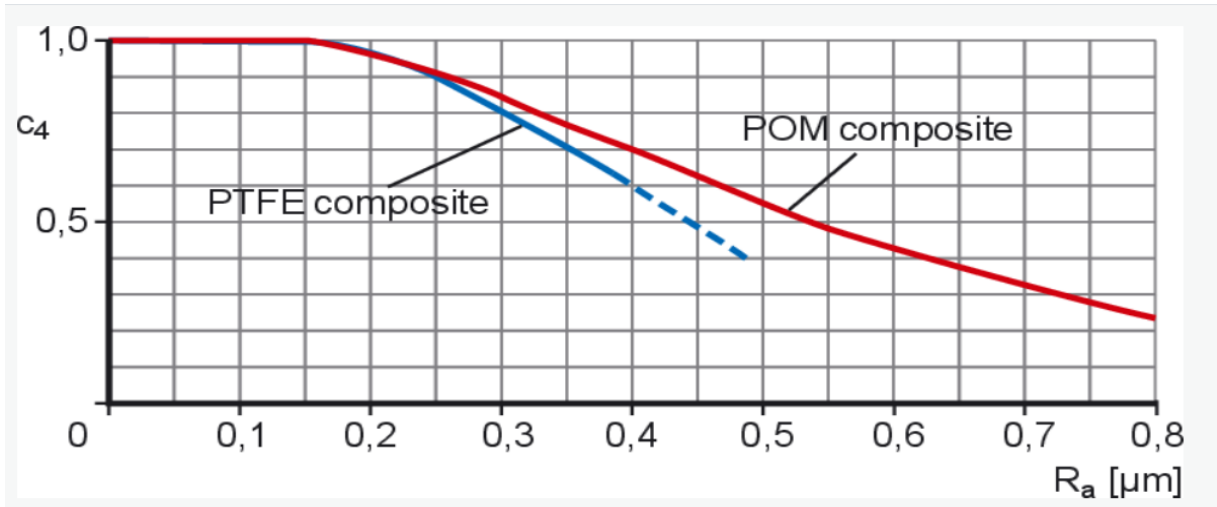


Gráfico 3.9 Factor de rugosidad para materiales de rodamientos de PTFE Y POM. Fuente: extraído el 20 de noviembre del 2020, www.SKF.com

Factor para el tipo de carga C_5 :

Como la carga es fija (es decir, la zona de carga está siempre en la misma posición de la circunferencia de rodamiento) el valor es igual a $C_5 = 1$

Exponente n

Este valor para los materiales de POM (Polioximetileno) y la velocidad de giro es menor a 1 m/s el exponente es de $n = 1$

Con todos los factores y elementos calculados la durabilidad en horas del cojinete de fricción es de $G_h = 567$ horas

3.4 DISEÑO DEL LAMINADOR.

Los criterios de diseño para el laminador son los siguientes:

- Fácil de desmontar
- Seguridad al usuario
- Materiales de venta comercial
- Fácil de construir
- Resista las capacidades del motor

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

Como los elementos críticos de la transmisión de potencia están dimensionados y seleccionados, es necesario presentar un primer boceto del laminador. El sistema de soporte de los rodillos se separa en tres piezas, la primera en el extremo superior que está sujeta a la pieza central del apoyo mediante pernos y tuercas, la última pieza de descanso está sujeta a la plancha a base de pernos. El segundo modelo corrige la dificultad de sujeción entre los soportes dejando un perno más largo que adosa las tres piezas de los costados. Los contornos son rectos con formas más fáciles de fabricar, con menos detalles. Se agrega la unión permanente soldada del soporte bajo del segundo rodillo. Ya en este segundo modelo se representa las medidas críticas del motor eléctrico, considerando la altura del eje a la par del motor. Las arandelas separadoras ya son consideradas restringiendo el movimiento de los rodillos de manera axial. El laminador y el motor eléctrico van sujetos a una sola plancha de 20 mm de espesor, esta idea dificulta el traslado de la máquina y deja al laminador con la dependencia de una mesa de trabajo. El modelo es tentativo pero su fabricación requiere de procesos de maquinado difíciles de hacer en la universidad, por lo que se plantea un tercer modelo basado en los bocetos previamente planteados. El plano de conjunto está en el anexo 2 con la especificación exacta de los componentes.

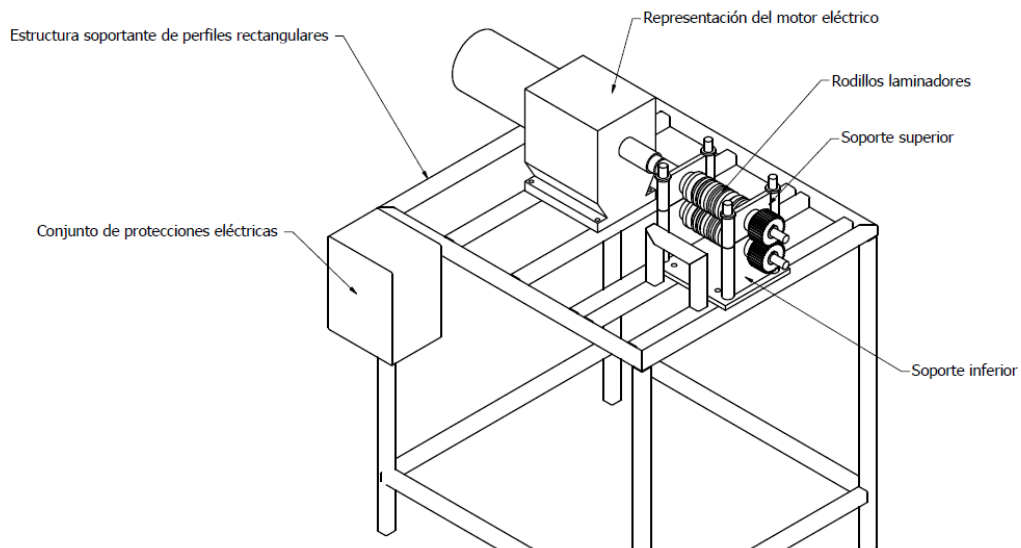


Ilustración 3.7 Representación de los componentes principales del laminador.

Fuente: elaboración propia

3.4.1 Soportes de rodillos

Los soportes de los rodillos van en contacto con los cojinetes de fricción y además se encargan de mantener centrados a los rodillos. Para el correcto dimensionamiento de los soportes se separan en soporte inferior y superior. Se estima que en el centro de los soportes donde están los cojinetes de fricción se producen las reacciones, la fuerza de laminación se tiene y es de magnitud $F = 35097,76 \text{ N}$, entonces las reacciones no se distribuyen de igual manera como se presentan en la siguiente figura de fuerzas cortantes realizado con el programa Inventor.

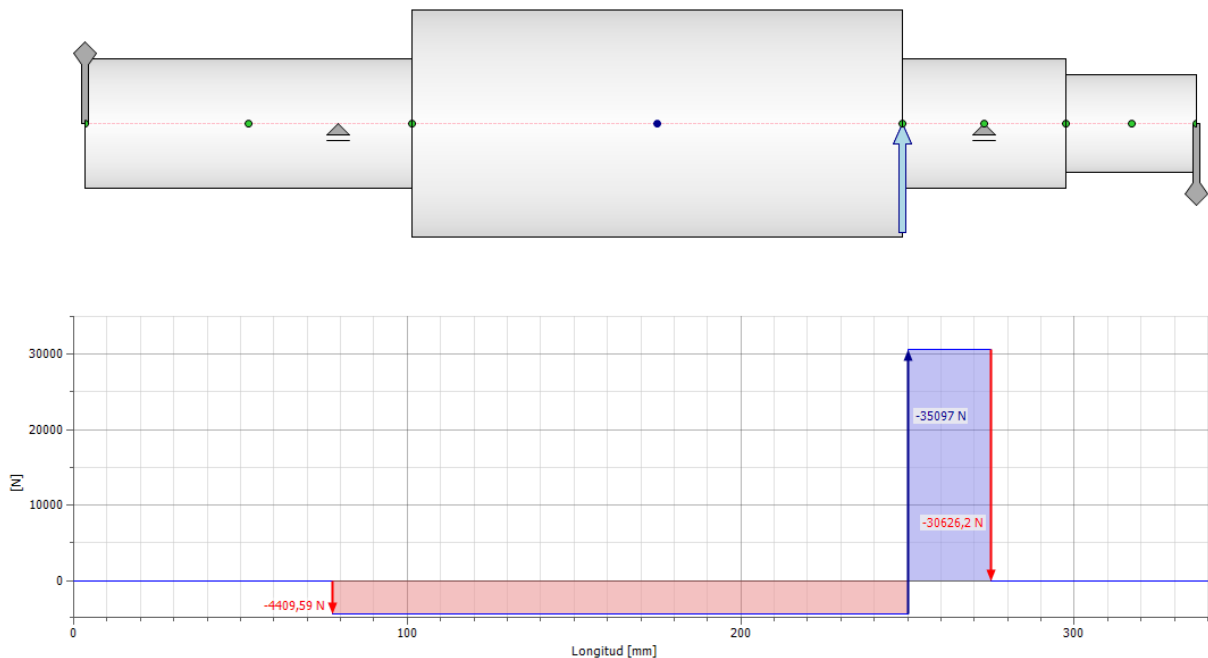


Ilustración 3.8 análisis de fuerzas de corte ocurridas en el rodillo y los puntos de apoyo realizado en Inventor. Fuente: Elaboración propia

Esta situación no es posible debido a que las molduras están ubicadas al centro del cilindro, entonces para el análisis de cargas en los soportes se considera que la carga ejercida en el soporte es de igual magnitud que la fuerza de laminación, además tomando en cuenta esta consideración la seguridad del usuario ante la falla de los soportes.

3.4.2 Soporte inferior

Las dimensiones de los soportes son presentadas en el anexo 2 de planos de fabricación y en la figura 3.9

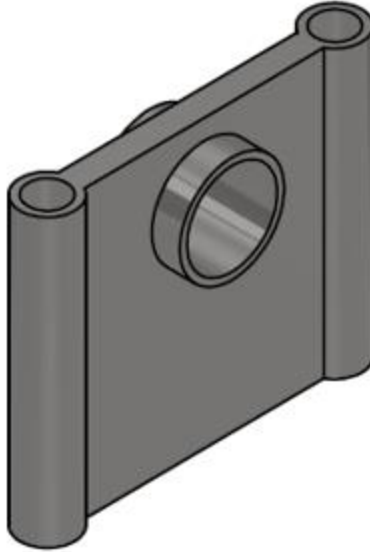


Ilustración 3.9Diseño realizado en Inventor

Autodesk. Fuente: Elaboración propia

Se estudia si el componente es capaz de resistir la fuerza de laminación ejercida por un dolo rodillo. Para determinar si el dimensionamiento y selección de los materiales fue el correcto son analizados en el programa ANSYS que permite el estudio del comportamiento de la estructura ante las cargas aplicadas. Para el soporte inferior se utilizaron las siguientes materias primas presentadas en la tabla 3.12.

Tabla 3.12Materias primas utilizadas en el soporte inferior. Fuente: Elaboración propia

Material	Descripción
Perfil tubular redondo	Acero ASTM 500 con un diámetro interno de 19,05 mm (3/4 de pulgada) con espesor de 1,5 mm
Tubo acero ASTM A53	Tubo comúnmente conocido como de acero negro ASTM A53 que no tiene costura en su interior de 48,30 mm diámetro exterior 2 pulgadas. Necesita un pequeño desgaste interior para que llegue a la dimensión requerida

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

Plancha de acero	Plancha con espesor de 12 mm de acero ASTM A36.
------------------	---

Para el análisis de estructural se considera el cojinete de fricción como punto de apoyo en la laminación del material. Como son dos soportes la aplicación es en la mitad, y se distribuyen de igual manera, pero en esta validación es en el extremo más lejano del punto apoyo obteniendo una carga de magnitud de laminación de $F = 35097,76 N$. En la siguiente tabla se presentan las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en la fabricación:

Tabla 3.13 Propiedades de los aluminios. Fuente: extraído del 21 de noviembre, www.matweb.com

Material	Esfuerzo de fluencia (S_y) Mpa	Esfuerzo último de tracción S_{ut} Mpa	Módulo de Young Gpa	Coefficiente de Poisson
ASTM A36	250	400	200	0,29
ASTM 500	240	415	210	0,29
ASTM A53	240	415	200	0,29

Con las propiedades de los materiales y la fuerza aplicada al soporte se presenta un modelo estático de la situación en el programa ANSYS como se presenta en la figura 3.11. La primera opción entregada al programa son las propiedades mecánicas de cada componente, luego se aplica un refinamiento en la plancha para obtener un estudio más uniforme en la zona de cambio de sección. El tamaño de malla indicado al programa es de 0,005 mm que es un valor arbitrario para el análisis determinado por las capacidades del computador, además de obtener un estudio más al detalle de la estructura. El punto de apoyo es en la cara superior (punto B) e inferior (punto C) del laminador como se muestra en la figura 3.11, se estima de esta manera ya que el soporte superior mantiene restringido el desplazamiento en dirección del eje z y a la vez está apoyada en la base del laminador. La fuerza se aplica en la cara inferior del centro de apoyo del rodamiento (punto A) en dirección al eje z con la magnitud de $F = 35097,76 N$ mostrado en la figura 3.12. Se ejecuta el cálculo matemático del programa obteniendo las deformaciones máximas y los coeficientes de seguridad de la estructura.

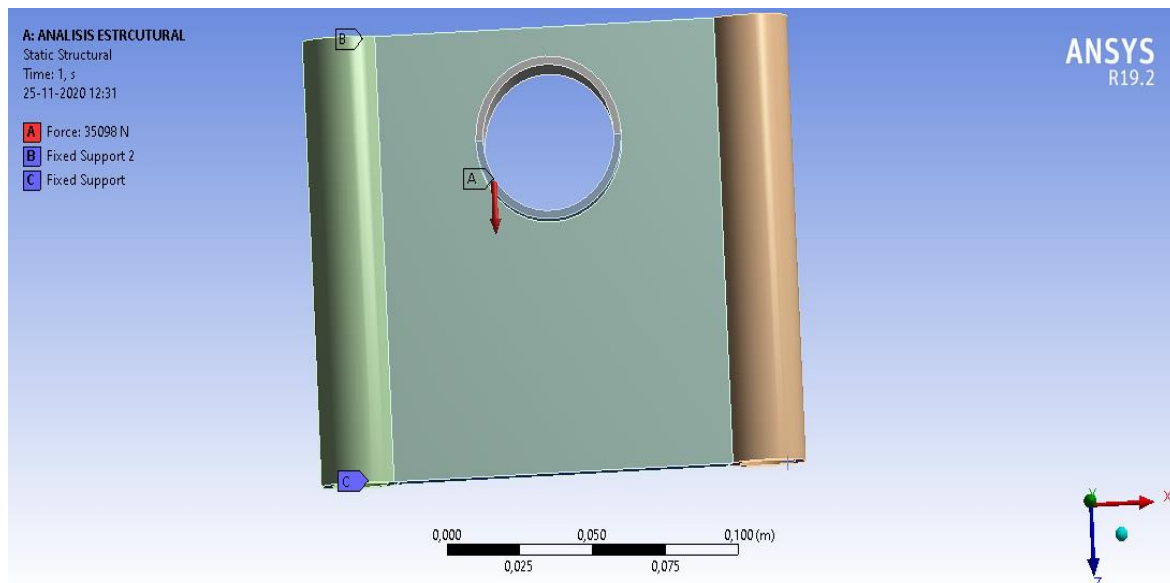


Ilustración 3.10 Fuerza y puntos de apoyo de la estructura realizada en ANSYS. Fuente: elaboración propia

3.4.3 Soporte superior

Las dimensiones de este soporte se presentan en el anexo 2 de planos de fabricación y a continuación se presenta el modelo del componente.

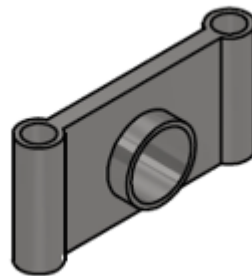


Ilustración 3.11 Modelo del soporte superior realizado en Autodesk Inventor. Fuente: Elaboración propia

Los materiales utilizados en este componente se presentan en la tabla 3.14.

Tabla 3.14 Materias primas y descripción basado en catálogos de fabricantes. Fuente: elaboración propia

Material	Descripción
Perfil tubular redondo	Acero ASTM 500 con un diámetro interno de 19,05 mm (3/4 de pulgada) con espesor de 1,5 mm
Tubo acero ASTM A56	Tubo comúnmente conocido como de acero negro ASTM A53 que no tiene costura en su interior. Posee un diámetro de 45 mm interno con un espesor de 3 mm
Plancha de acero	Plancha con espesor de 12 mm de acero ASTM A36.

La fuerza aplicada a este componente se plantea de igual manera que el soporte inferior solo cambiando el sentido de aplicación de la carga, y se debe a que soporta al rodillo superior cambiando la dirección de la fuerza de laminación. Las propiedades mecánicas de los materiales son obtenidas de la tabla 3.13. En la figura 3.14 se aprecia que la fuerza de laminación (punto A) tiene un sentido contrario al estudio anteriormente, la sujeción se considera solo la que restrinja el movimiento opuesto a la fuerza y se ubica en la cara que está en contacto con la tuerca, mientras que la cara inferior del componente está en contacto con el soporte inferior.

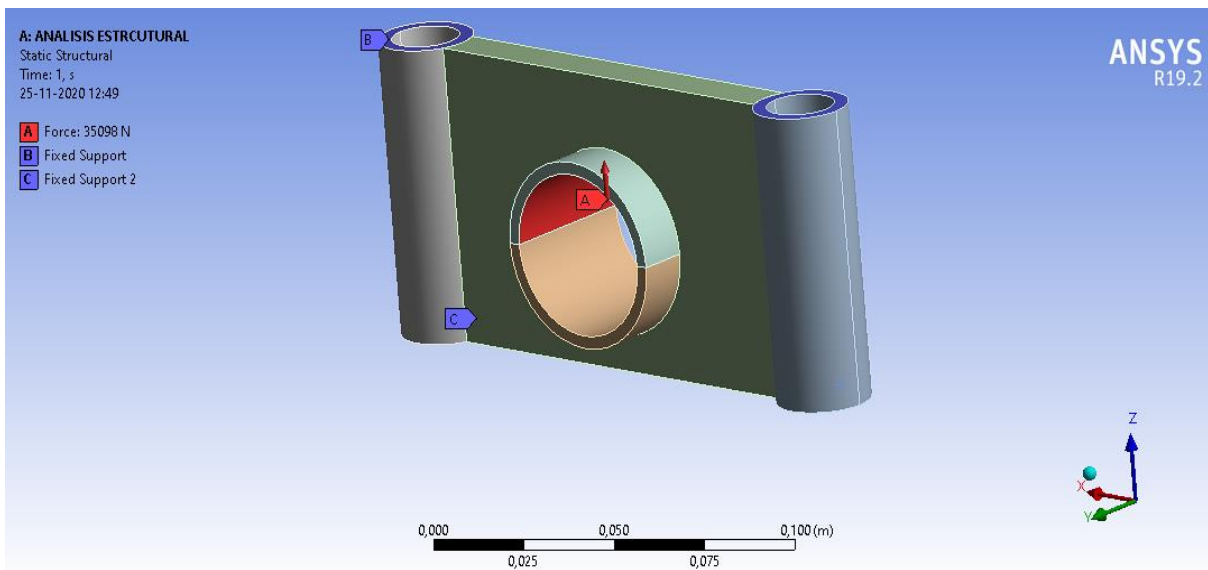


Ilustración 3.12 Fuerza y puntos de apoyo del soporte superior realizado en ANSYS. Fuente: elaboración propia

3.4.4 Base del laminador

Este componente se encarga de mantener y restringir los movimientos a los soportes, en la figura 3.15 se aprecia un dibujo tridimensional realizado en Autodesk Inventor.

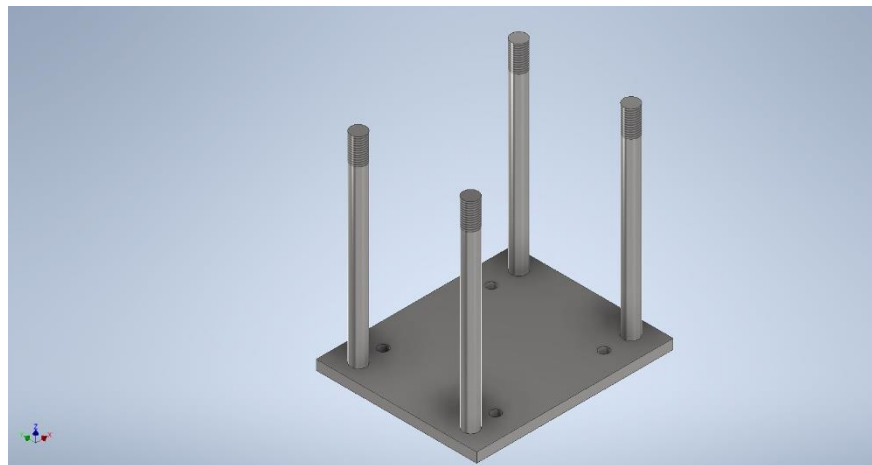


Ilustración 3.13 Dibujo tridimensional de la base del laminador realizado en Autodesk Inventor. Fuente: elaboración propia

En la parte superior de las barras redondas se realiza una rosca de $\frac{3}{4}$ con paso de 16 roscas por pulgadas (Normas de tornillo UNC y UNF, Diseño de ingeniería Mecánica, Shigley, 2008). El detalle de los componentes principales se presenta en la siguiente tabla 3.15.

Tabla 3.15 Material necesario para la fabricación. Fuente: elaboración propia

Material	Descripción
Plancha de acero	Plancha con espesor de 12 mm de acero ASTM A36.
Barra redonda	Barra con diámetro de 19,05 mm ($\frac{3}{4}$ de pulgada) de acero ASTM A36

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

Para el análisis de la estructura se utiliza el programa ANSYS que se selecciona el sistema de análisis estático estructural. El proceso comienza con ingresar las propiedades del acero ASTM A36 al programa para luego crear el mallado de la pieza. La carga de laminación (punto B) en este caso se ubica en el centro de la pieza como se puede apreciar en la imagen 3.16, además se considera que la cara inferior del laminador es el punto de apoyo (punto A) restringiendo el movimiento de la pieza en dirección del eje perpendicular del ancho de la plancha.

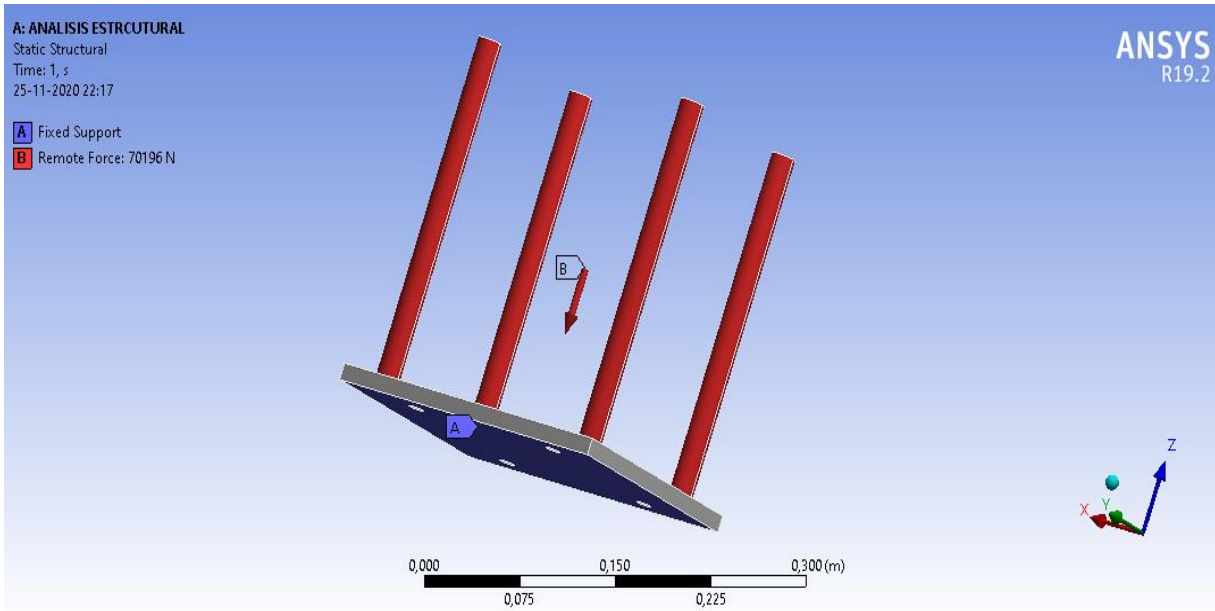


Ilustración 3.14 Fuerza aplicada y superficie de soporte de la base del laminador en ANSYS.

Fuente: Elaboración propia

3.4.5 Elementos de sujeción

La base en el extremo de la barra tiene un roscado para colocar una tuerca de $\frac{3}{4}$ de pulgada, que tendrá un paso de $\frac{1}{6}$ de pulgada. Para calcular el coeficiente de seguridad de la tuerca en la zona roscada se estima que las varas son pernos fabricados con acero ASTM A36, y la resistencia que deben resistir es la suma de las fuerzas de laminación provocadas en ambos rodillos $F_p = 70195 N = 15,78 Kip$. El total de los pernos considerados es de 4 pernos y en la parte superior se utiliza una tuerca hexagonal B.S 1768 de $\frac{3}{4}$ de pulgada.

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

Para calcular el coeficiente de seguridad se utiliza la siguiente formula 55:

(50)

$$n = \frac{S_p * A_t}{C \left(\frac{F_p}{N} \right)}$$

Donde:

S_p : Resistencia de prueba mínima

A_t : área de esfuerzo de tensión

C : constante de rigidez

N : cantidad de pernos

La resistencia de prueba mínima se obtiene del catálogo de fabricante en el anexo 5 al igual que el área de esfuerzo de tensión para la tuerca siendo ambas iguales a $S_p = 85 \text{ kpi}$ y $A_t = 0,373 \text{ pulg}^2$.

La constante rigidez del perno se obtiene con la fórmula:

$$C = \frac{k_b}{k_b + k_m}$$

Donde:

k_b : Rigidez de los elementos

k_m : rigidez del material

$k_b = 1,28 \frac{\text{Mlbf}}{\text{pulgada}}$ y la rigidez de los materiales es igual a $k_m = 6,82 \frac{\text{Mlbf}}{\text{pulgada}}$, se calcularon en base a las propiedades presentadas en el libro de Diseño de Ingeniería mecánica, Shigley. Al reemplazar los valores se obtiene $C = 0,158$.

Reemplazando los valores obtenidos en la ecuación 55 se obtiene un coeficiente de seguridad de $n = 4,9$, indicando que las tuercas seleccionadas son las correctas.

Para los pernos de sujeción se considera el torque que ejerce el motor calculando la fuerza que ejerce siendo igual a $Ft = 14150 \text{ N}$ para poder aplicar los datos obtenidos de

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

fabricante esta fuerza es transformada a $Ft = 1442,91 \text{ kfg}$, se estima un perno M12 grado SP 5.8 y en la siguiente tabla se presentan las propiedades del perno:

Tabla 3.16 Propiedades del perno M12 Sp 5.8. Fuente: Catalogo de fabricantes Sodiper

Propiedad	Unidades
Carga de prueba S_p	38 Kgf/mm^2
Resistencia a la tracción S_t	50 Kgf/mm^2

Para calcular el aplastamiento de los pernos se utiliza la siguiente fórmula

$$\frac{Ft}{2 * t * d} = \frac{S_p}{Nd}$$

Donde:

t : espesor del material

d : diámetro exterior del perno

Nd : coeficiente de seguridad

Ft : fuerza aplicada al perno

El espesor entre la base y los perfiles es de 42 mm, el diámetro del perno es de 12 mm y la carga de prueba $S_p = 38 \text{ Kgf/mm}^2$, despejando el coeficiente de seguridad entrega un valor de $Nd = 28$ siendo en primera instancia lo suficientemente resistente para resistir el aplastamiento.

El perno de anclaje sufre esfuerzos de corte que se determinan con la siguiente ecuación:

$$\tau = \frac{F}{4\pi * \frac{d^2}{4}} = 0,577 \frac{S_p}{Nd}$$

Reemplazando los valores previamente obtenidos se obtiene el siguiente coeficiente de seguridad $nd = 19,08$ teniendo un coeficiente lo suficientemente resistente a los esfuerzos de corte que se generan en el laminador base. Con esta comprobación indica que el perno seleccionado es el indicado para mantener a la base en su posición.

3.4.6 Soldadura crítica

El análisis de soldadura se realiza a la base del laminador en donde está en contacto entre la barra y la plancha. La manera de determinar si la soldadura resiste a la tensión que ejerce el laminador es comparando el esfuerzo de tensión del cuerpo en la unión σ_u con el esfuerzo permisible σ_{perm} . Para calcular el esfuerzo σ_u se utiliza la siguiente ecuación:

(51)

$$\sigma_u = \frac{F}{A_c}$$

Donde:

F : fuerza de laminación

A_c : área de contacto

La carga que tiene que resistir es la de laminación, pero como en los puntos de apoyo existen dos varas la fuerza de laminación se reduce a la mitad, por lo tanto, se obtiene el siguiente esfuerzo de tensión en el cuerpo de la soldadura $\sigma_u = 61,89 \text{ mpa}$. El esfuerzo permisible de la soldadura se obtiene con la siguiente ecuación 57 obtenida de la tabla 3.16:

Tabla 3.17 Esfuerzos permisibles del código AISC para metal de aporte. Fuente: Diseño de Ingeniería, Shigley.

Tipo de carga	Tipo de soldadura	Esfuerzo permisible	Factor de seguridad calculado de la teoría de distorsión
Tensión	A tope	$0,60S_y$	1,67
Aplastamiento	A tope	$0,90S_y$	1,11
Flexión	A tope	$0,60S_y-0,66S_y$	1,52-1,67
Compresión simple	A tope	$0,60S_y$	1,67
Cortante	A tope de filete	$0,40S_y$	1,67

(52)

$$\sigma_{perm} = 0,6 S_y$$

Donde:

s_y : esfuerzo de fluencia del material.

El esfuerzo de fluencia del material obtenido en la tabla 3.13 es $S_y = 250$, obteniendo el esfuerzo permisible igual a $\sigma_{perm} = 150 \text{ Mpa}$, comparando que el $\sigma_{perm} > \sigma_u$ esto indica que el esfuerzo generado en la zona de contacto es menor al esfuerzo permisible.

Falta determinar si la soldadura resiste a los esfuerzos cortantes y se comparando entre el esfuerzo cortante permisible con el esfuerzo cortante del material. El esfuerzo cortante del material se determina con la siguiente ecuación 58:

(53)

$$\tau = \frac{F}{2hL_{per}}$$

Donde

h : altura de la soldadura

L_{per} : largo de la soldadura

La manera de calcular el largo de cada soldadura es calculando el perímetro de contacto entre la vara y la plancha, el diámetro se conoce y es igual a 19,05 mm obteniendo el perímetro igual a $L_{per} = 0,059 \text{ m}$, la Welding Foundation que es la organización que presta soporte a la industria en Canadá recomienda que para diámetros mayores a 1/2 pulgada se utilice una altura de soldadura de 3/4 de pulgada obteniendo el siguiente resultado $\tau = 7,83 \text{ Mpa}$.

Mientras que el esfuerzo permisible se determina con la ecuación 59 obtenida en la tabla 3.16.

(54)

$$\tau_{perm} = 0,4 S_y$$

Como ya se sabe el esfuerzo de fluencia del material obtenido en la tabla 3.13 el esfuerzo cortante permisible es $\tau_{perm} = 100 \text{ Mpa}$. El esfuerzo de corte permisible es mucho mayor que

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

el obtenido por el material indicando que la altura de la soldadura y la unión creada entre la barra y la plancha base resistirá la tensión además del esfuerzo generado por la laminación. Para seleccionar el electrodo es mediante la siguiente tabla

Tabla 3.18 Esfuerzos de corte permisibles de los electrodos. Fuente: Diseño de ingeniería mecánica, Shigley, 2008+

Número del electrodo	τ_e (Mpa)
E60XX	124
E70XX	144
E80XX	165
E90XX	186
E100XX	206
E110XX	227
E120XX	248

Comparando el esfuerzo de corte generado en el material $\tau = 7,83 \text{ Mpa}$ y el que permite el primer electrodo $\tau_e = 124 \text{ Mpa}$, se puede decir que es el óptimo para utilizar. Ahora solo queda elegir el tipo de recubrimiento que tendrá y la posición de la soldadura. Se recomienda utilizar el electrodo E6011 que sirve para soldar aceros dulces o al carbono en cualquier posición.

3.4.7 Estructura soportante de perfiles

La estructura soporta al laminador y el motor manteniéndolos en posiciones fijas. Los materiales utilizados se presentan en la siguiente tabla de materiales: y una figura de la estructura en la ilustración

Tabla 3.19 Características del perfil. Fuente: extraído el 23 de noviembre, [www. kapeuf.cl](http://www.kapeuf.cl)

Material	Descripción
Perfiles cuadrados	Perfil cuadrado de 30x30 mm y 2 mm de espesor de acero ASTM A36

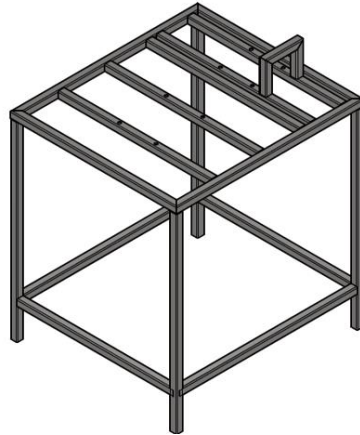


Ilustración 3.15 Imagen de la estructura metálica realizada en Autodesk Inventor. Fuente: Elaboración Propia

Las propiedades mecánicas del acero ASTM A36 se presentan en la tabla 3.13, mientras que las dimensiones de los perfiles pueden ser observados en el anexo 2 de planos de fabricación.

Para determinar la carga que se ejerce sobre la estructura es necesario en primer lugar calcular las masas del laminador y el motor eléctrico. Dichas masas se presentan en la tabla 3.19, además de las fuerzas que ejerce cada componente.

Tabla 3.20 Detalle de componentes y fuerza ejercida. Fuente: elaboración propia

Componente	Masa (Kg)	Carga (Kgf)
Laminador	21,69	212,78
Motor eléctrico	53	519,93

El detalle de las masas del laminador se presenta en la siguiente tabla 3.20:

Tabla 3.21 Detalles de los componentes del laminador. Fuente: elaboración propia

Componente	Masa (kg)
Soporte superior	2,12
Soporte inferior	1,17
Rodillo 1	5,56

Rodillo 2	5,91
Base del laminador	6,93

Como se tienen las cargas ejercidas sobre la estructura se plantea en el programa ANSYS un análisis estático, además de ingresar las propiedades mecánicas del acero ASTM A36, obteniendo la siguiente figura 3.18. Se aplica los puntos de apoyo (punto A) en las bases de las patas de la estructura y se distribuyen la carga del laminador (Puntos: B, C, D y E) sobre la cara superior de igual manera que la carga del motor (Puntos E y F) como se muestra en la ilustración 3.12. Se aplica la malla sobre todo la estructura y como la carga es simétrica en cada cara soportante se obtiene la figura 3.18.

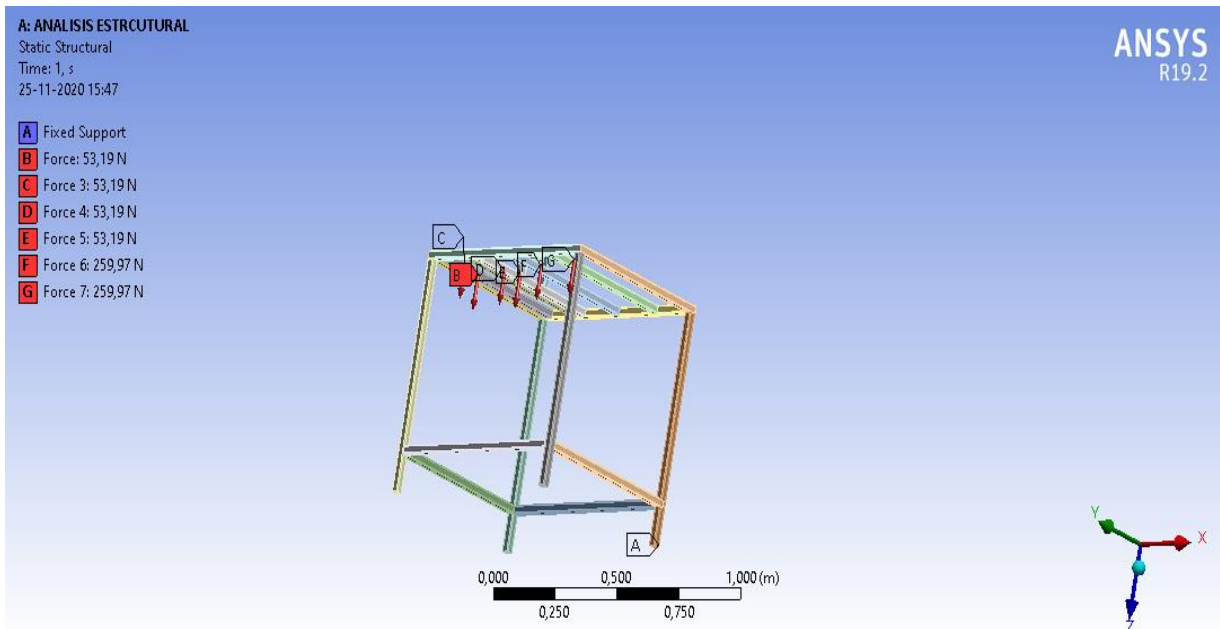


Ilustración 3.16 Distribución de las cargas y puntos de apoyo en ANSYS. Fuente: elaboración propia

3.4.8 Sistema de protección

Las protecciones son fijas del tipo envolvente que restringen al usuario poder atascarse en los engranes y en el acople del motor al rodillo. Están fijas mediante tornillos que prohíben al usuario poder retirarlas fácilmente y el material de confección de las protecciones es mediante una plancha galvanizada de 0,3 mm de espesor que serán unidas por soldadura de puntos. No es

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

necesario un cálculo de sus dimensiones como son solo protecciones y no tendrán una aplicación de fuerzas sobre estas. A continuación, se presentan las protecciones del sistema de acople (Protección B) y para los engranes (Protección A).

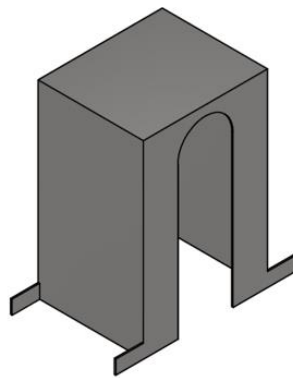


Ilustración 3.18 Sistema de protección B diseñado en Autodesk Inventor. Fuente: Elaboración propia

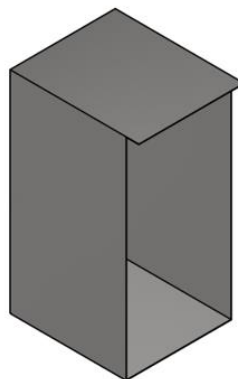


Ilustración 3.17 Sistema de protección diseñado en Autodesk Inventor. Fuente: elaboración propia

3.4.9 Dimensionamiento de los componentes eléctricos

Para poder entender y justificar los componentes eléctricos se presentan esquemas representativos del circuito de control y el circuito de fuerza del laminador. Los circuitos de control son los encargados de entregar la orden al motor eléctrico para que funcione, mientras que en los circuitos de fuerza es la conexión directa al sistema de media tensión (380 volts). En la figura 3.20 se presenta el circuito de control y el funcionamiento es simple, la alimentación es con la red 220 volts en la parte superior, el siguiente componente es el contacto del relé de sobrecarga normalmente cerrado (F) que, en caso de existir un sobrecalentamiento de los cables conductores de fuerza, abre el sistema y no permite poder conectar el motor a la red y se indica con la luz piloto (H). El siguiente componente es el pulsador Z (S1) que se conoce como pulsador de parada, la función que tiene es abrir el circuito de control deteniendo al motor. El encargado de poner en marcha el laminador es el pulsador (S2) que permite al contactor (K1) poder autoalimentarse en la red de control con el contacto normalmente abierto (K1) y cerrar sus contactos de fuerza alimentado al motor.

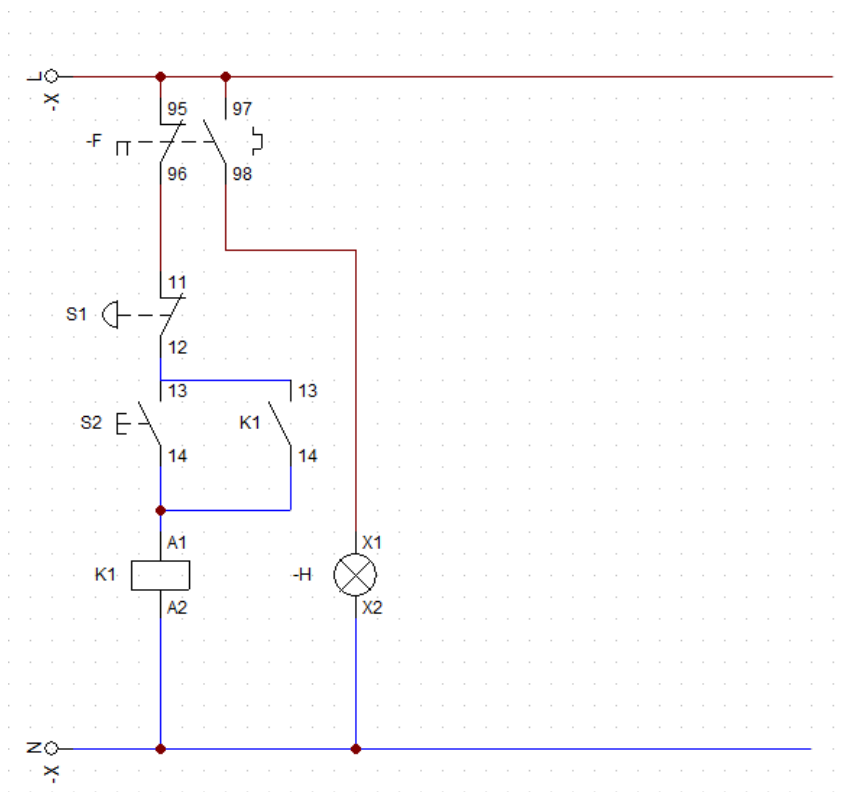


Ilustración 3.19 Circuito de control creado en CADE SIMU. Fuente elaboración propia

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

El circuito de fuerza presentado en la figura 3.21 tiene la alimentación de red trifásica de 380 volts, que se acciona cuando el contactor (K1) es alimentado en el esquema de control, esto cierra los contactos de potencia permitiendo el paso de la corriente al motor del laminador (M). El relé de sobrecarga (F) su accionamiento es térmico ya que si existe un aumento de la temperatura de los conductores de potencia del motor deforma interiormente bimetales abriendo el circuito de control.

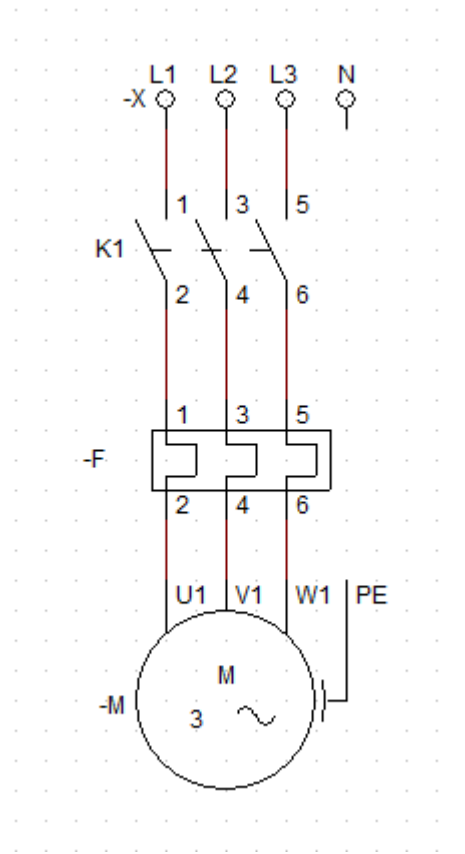


Ilustración 3.20 Esquema del circuito de fuerza creado en Cade Simu. Fuente elaboración propia.

El motor tiene una corriente nominal de 3,6 amperes conectado a una red trifásica y entrega una potencia de 1,6 kw (Ver tabla 3.1). Con estos parámetros y basándose en las normas chilenas de electricidad se pueden dimensionar las protecciones eléctricas y además seleccionar los principales componentes para su funcionamiento. La norma chilena de electricidad 12.3.1.2 recomienda que para todo motor cuya potencia sea superior a 1 HP deberá protegerse, contras las sobrecargas, que tenga una capacidad de reacción a no más de 1.25 veces la corriente nominal

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

del motor en plena carga. Para los cables conductores se seleccionan mediante tablas y las normas chilenas de electricidad 12.2.2 indican que deben ser capaces de transmitir 1,25 veces la corriente plena de carga del motor (Instalaciones de consumo en baja y media tensión, Superintendencia de electricidad y combustibles S.E.C, 2003).

Entonces el consumo nominal del motor es de 3,6 amperes obteniendo el consumo de dimensionamiento igual a 4,5 amperes. La selección de los componentes fue mediante catálogos del comercio especializado y en la siguiente tabla se resumen los seleccionados.

Tabla 3.22 Selección de los componentes eléctricos y descripción. Fuente: elaboración propia

Componentes eléctricos	Descripción
Gabinete de tablero	Tiene una dimensión de 250x200x150 mm que permite montar los componentes eléctricos
Guardamotor	Modelo 4-63 tiene una curva de respuesta tipo C que cumple la función de relé de sobrecarga y disyuntor (protege al circuito mediante campos magnéticos que si existe la excitación de su contacto abre el circuito prohibiendo el paso de la corriente)
Pulsador Z	Encargado de detener al motor eléctrico
Pulsador de marcha	Pulsador NO para sistema de control de 220 v.
Contactador	Contactador de tres polos 12 A -220 Schneider, este componente se dimensiona con la potencia que entrega el motor y sea superior a la de consumo nominal.
Enchufe Macho	Enchufe macho volante 3 fases con máxima transferencia de 32 A 380 volts IP67
Conductor	Mediante catálogo de fabricantes y el consumo considerado de 4.5 amperes la

	sección mínima transversal del conductor es de $0,821 \text{ mm}^2$ normalizado AWG-MCM
--	---

3.5 PLANOS DE FABRICACIÓN

Como se tiene la validación de los componentes más importantes se realiza el plano de conjunto y explosión que se encuentran en anexo 2 de planos de fabricación. El plano de conjunto del laminador es el primer anexo y es utilizado para entender las posiciones de los siguientes planos de fabricación:

- Soporte del rodillo superior
- Soporte del rodillo inferior
- Base del laminador
- Estructura metálica de perfiles
- Sistema de protección A
- Sistema de protección B

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 ESTIMACIÓN DEL TRABAJO EN FRÍO

La capacidad de trabajo en frío (capacidad de deformar) se estima una misma razón de reducción en cada muesca o canaleta. La condición es que reduzcan en un milímetro el espesor del material considerando desde el diámetro final del material a la salida del laminador y en la siguiente imagen se presentan las canaletas estudiadas.

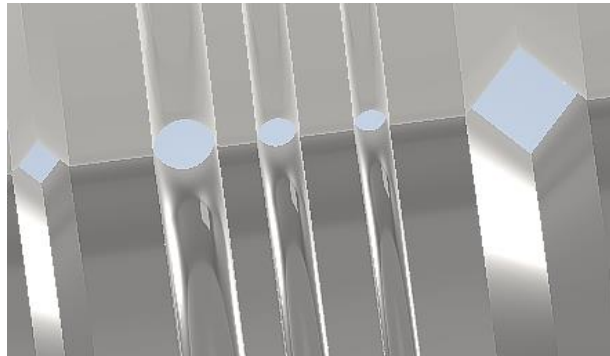


Ilustración 4.1 Vista en detalle de las canaletas de los rodillos realizado en Autodesk Inventor.

Fuente: elaboración propia

La estimación del máximo trabajo en frío se hace comparando con el torque que entrega el motor (283 Nm) y el torque necesario en la laminación, con estos datos se entregan las tablas de resumen de los resultados del anexo 1, cabe destacar que las reducciones de diámetros son consideradas como mínimas de 1 mm debido a que una reducción menor se estaría en condiciones de pensar en otro método de cambio de sección como es un pulido superficial del material.

Tabla 4.1 Trabajo en frío del aluminio 1100-O. Fuente: elaboración propia

Aluminio 1100-O		
Canaletas	Diámetro inicial (mm)	Máximo trabajo en frío (%)
Canaleta de 5 mm	8	94%
Canaleta de 6 mm	8	58%
Canaleta de 10 mm	12	36%

Capítulo 4. Análisis de resultados

Tabla 4.2 Trabajo en frío para aluminio 2024-T4. Fuente: elaboración propia

Aluminio 2024-T4		
Canaletas	Diámetro inicial (mm)	Máximo trabajo en frío (%)
Canaleta de 5 mm	6	36%
Canaleta de 6 mm	7	31%
Canaleta de 10 mm		

Tabla 4.3 Trabajo en frío del aluminio 6061-O. Fuente: elaboración propia

Aluminio 6061-O		
Canaletas	Diámetro inicial (mm)	Máximo trabajo en frío (%)
Canaleta de 5 mm	8	94%
Canaleta de 6 mm	9	81%
Canaleta de 10 mm	12	36%

Tabla 4.4 Trabajo en frío del aluminio 6061-T6. Fuente: elaboración propia

Aluminio 6061-T6		
Canaletas	Diámetro inicial (mm)	Máximo trabajo en frío (%)
Canaleta de 5 mm	6	36%
Canaleta de 6 mm	7	31%
Canaleta de 10 mm	11	19%

Tabla 4.5 Trabajo en frío del aluminio 7075-O. Fuente elaboración propia

Aluminio 7075-O		
Canaletas	Diámetro inicial (mm)	Máximo trabajo en frío (%)
Canaleta de 5 mm	7	36%
Canaleta de 6 mm	7	31%
Canaleta de 10 mm	11	19%

4.1.1 Análisis del trabajo en frío

Analizando los porcentajes de deformación en cada uno de materiales se logra obtener el trabajo en frío del material, donde cada valor depende del coeficiente de endurecimiento que tenga, por ejemplo, el aluminio que tiene el menor coeficiente de dureza en una canaleta de 5 mm alcanza un trabajo máximo en frío de 94%. Los torques necesarios para el trabajo máximo en muchos casos no son precisamente cercanos al torque del motor, pero esto sucede ya que una reducción de 1 mm es un valor aceptable, pero si la reducción es menor de un milímetro se recomendaría realizar algún proceso de pulido o reducción mediante maquinaria, entonces acercar el valor del torque necesario al torque del motor implicaría realizar reducciones insignificantes. En el aluminio 2024-T4 que tiene el mayor porcentaje de dureza no es posible deformarlo en la canaleta de 10 mm. Analizando para un mismo material el porcentaje de trabajo es mayor para las canaletas de menor diámetro y se debe a que el cambio de sección es mayor, mientras que el torque es mayor para un torque de trabajo debido a que mayor diámetro es más elevado el requerimiento del equipo.

4.2 VALIDACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS

Los resultados obtenidos de la validación de estructura con el programa ANSYS se resumen en la siguiente tabla 4.3 en que los datos de interés son la deformación total y el factor de seguridad. El factor de seguridad es clave para determinar si las dimensiones y materiales utilizados son los correctos, las imágenes de los resultados se presentan en el anexo 3 de resultados de análisis de carga para cada caso estudiado

Tabla 4.6 Resultados obtenidos del análisis de cargas con el programa ANSYS. Fuente: elaboración propia

Componente	Factor de seguridad crítico
Soporte inferior	1,3
Soporte superior	1,6
Base del laminador	1,8
Estructura metálica de perfiles	4,5

4.2.1 Análisis de resultados soporte inferior.

La deformación provocada por la laminación se presenta en la figura del anexo 3, en donde se presenta el punto de mayor deformación y el mínimo que alcanza la estructura al laminar, la máxima deformación tiene un valor de $\varepsilon_{m\acute{a}x} = 0,00004 \text{ m}$. La deformación máxima es en el extremo en voladizo de la cara en la que se aplica la fuerza y esta no tiene un soporte que ayude a oponerse a la fuerza de corte. El mínimo es la zona más alejada a la fuerza. Con estos parámetros en primera instancia indica que el soporte inferior es capaz de soportar una laminación en un caso extremo.

El factor de seguridad en el punto crítico tiene un valor de $F.S = 1,3$, la estimación de la fuerza de aplicación es en una situación extrema y en la laminación práctica este factor aumenta ya que la fuerza se distribuye proporcionalmente entre los soportes.

4.2.2 Análisis de resultados soporte superior

En el anexo 3 se presenta la máxima deformación existente en el soporte, el mínimo tiene una magnitud de 0 m y se debe a que simplemente es el punto más alejado de la cara en donde se aplica la fuerza. La máxima deformación tiene un valor de $\varepsilon_{m\acute{a}x} = 0,00005 \text{ m}$, esto ocurre ya que está en la cara de la aplicación de la fuerza y es en la zona libre donde no tiene un punto de apoyo con la estructura.

El factor de seguridad es en la zona crítica es $F.S = 1,6$ porque el punto de falla está en el extremo libre de la cara en donde se aplica la fuerza. La zona que tiene el mayor factor de seguridad es $F.S = 9,9$ es en la cara superior donde la tuerca de sujeción cumple el rol de empotramiento. Considerando el factor crítico de seguridad aplicado a la máxima fuerza al soporte de apoyo se puede decir que la estructura no fallará cuando se lamine un material, no es el óptimo, pero como se consideró que la fuerza se aplica en el otro extremo de la figura solo siendo soportado por un componente que en un caso verdadero la fuerza se distribuye en dos soportes.

4.2.3 Análisis de resultados base del laminador

La carga la soporta en los extremos libres de las varas, se debe a que la laminación se produce en el centro de la estructura y los puntos de apoyo de los soportes son presionados bajo la tuerca que se ubica en el extremo superior, por lo tanto, la máxima deformación se produce en la cara superior. En este punto se destaca que la carga de laminación se distribuye uniformemente en la estructura. La deformación máxima igual a $\varepsilon_{m\acute{a}x} = 0,00015\ m$ y mínima que fue nula.

El factor de seguridad mínimo tiene un valor de $F.S = 1,8$ y se ubica el factor crítico en la zona de soldadura que fue previamente estudiado. Este mínimo se debe a que la aplicación de la fuerza es en la cara superior y al momento de llegar a la base se produce un torque con un brazo de palanca que va desde el centro de la vara hasta el punto entre el diámetro de la vara con la plancha base. Por lo tanto, la base del laminador resiste la fuerza de laminación.

4.2.4 Análisis de resultados de la estructura metálica de perfiles

La deformación máxima que se produce es igual a $\varepsilon_{m\acute{a}x} = 0,0003\ m$, se ubica la cara externa del laminador en los perfiles centrales, y se debe a que en este sector resiste las cargas que ejerce tanto el laminador como el motor eléctrico.

La estructura al ser analizada en el programa ANSYS tiene un coeficiente de seguridad mínimo $F.S = 4.5$ siendo un factor considerable para poder soportar todos los componentes.

Capítulo 4. Análisis de resultados

La ubicación del factor mínimo se ubica en la zona de contacto entre la estructura superior y las patas de la bancada, se debe a que es la zona donde resiste la carga del laminador y el motor eléctrico.

4.3 COMPONENTES Y MATERIAS PRIMAS DEL LAMINADOR

En esta sección se entregará un listado de los componentes necesarios para la fabricación y las materias primas para poder fabricar los elementos clave.

Tabla 4.7 Componentes y materia prima. Fuente: elaboración propia

Componente	Detalle
Motor eléctrico	modelo ZG3 KMRB 80 G. 4, que funciona 220/380 v y un consumo de 6.2/3.6 amperes
Engranés rectos	diámetro primitivo 70 mm, módulo de 2 mm, número de dientes 35 y un ancho de 40 mm
Chavetas para la transmisión	ancho de 12 mm, altura de 8 mm y un largo de 40 mm realizada en ASTM A36 con normas DIN 6865
Chavetas para los engranes	ancho de 10 mm, altura de 8 mm y un largo de 30 mm realizada en ASTM A36 con normas DIN 6865
Cojinetes de fricción	modelo SKF PCM 404440 E
Perfil tubular redondo	acero ASTM 500 con un diámetro interno de 19,05 mm (3/4 de pulgada) con espesor de 1,5 mm
Tubo acero ASTM A53	tubo comúnmente conocido como de acero negro ASTM A53 que no tiene costura en su interior de 48,30 mm diámetro exterior 2 pulgadas. Necesita un pequeño desgaste interior para que llegue a la dimensión requerida

Capítulo 4. Análisis de resultados

Plancha de acero	plancha con espesor de 12 mm de acero ASTM A36.
Barra redonda	barra con diámetro de 19,05 mm (3/4 de pulgada) de acero ASTM A36
Tuerca Hexagonal 3/4	tuerca hexagonal B.S 1768 de 3/4 de pulgada
Pernos de anclaje del laminador	perno M12 grado SP 5.8
Perfiles cuadrados	perfil cuadrado de 30x30 mm y 2 mm de espesor de acero ASTM A36
Plancha galvanizada	Plancha galvanizada de espesor de 0,3 mm
Gabinete de tablero	Tiene una dimensión de 250x200x150 mm que permite montar los componentes eléctricos
Guardamotor	Modelo 4-63 tiene una curva de respuesta tipo C que cumple la función de relé de sobrecarga y disyuntor (protege al circuito mediante campos magnéticos que si existe la excitación de su contacto abre el circuito prohibiendo el paso de la corriente)
Pulsador Z	Encargado de detener al motor eléctrico
Pulsador de marcha	Pulsador NO para sistema de control de 220 v.
Contactador	Contactador de tres polos 12 A -220 Schneider, este componente se dimensiona con la potencia que entrega el motor y sea superior a la de consumo nominal.
Enchufe Macho	Enchufe macho volante 3 fases con máxima transferencia de 32 A 380 volts IP67
Conductor	Mediante catálogo de fabricantes y el consumo considerado de 4.5 amperes la

	sección mínima transversal del conductor es de $0,821 \text{ mm}^2$ normalizado AWG-MCM
--	---

4.4 COSTOS

Los costos de fabricación son estimativos, ya que pueden variar en el mercado. Las cotizaciones fueron realizadas de manera en línea ya que por la situación actual de pandemia se restringe la visita de especialistas en venta, además los costos están con I.V.A en pesos chilenos.

En este punto los costos se presentan los más representativos

- Costos de materias primas
- Componentes normalizados
- Costos de fabricación
- Costos de ingeniería

Donde:

Costos de materias primas: La materia prima es todo material que permite la fabricación del laminador, básicamente son materiales dimensionados que pueden ser comprados en el mercado en pesos chilenos, en el anexo 4 se presentan los costos en detalle.

Componentes normalizados: Son los componentes fundamentales que se pueden comprar en el mercado.

El resultado total de los costos se presenta en la tabla 4.8:

Tabla 4.8 Resumen de los costos obtenidos. Fuente: elaboración propia

Costos	Valor de los costos
Costos materias primas	\$62.591
Costos componentes normalizados	\$132.556
Costo total del proyecto	\$195.147

4.4.1 Análisis de los costos

Los costos estimados en este proyecto para el laminador tienen un carácter comercial ya que la fabricación de este laminador será en la universidad donde costo por ingeniería no se considera y si es desarrollado por alumnos de la universidad el costo de fabricación también no

Capítulo 4. Análisis de resultados

se consideraría, por lo tanto, considerando el costo del laminador fabricado en la universidad tendría un precio aproximado de \$195.147. El valor es bajo ya que se tienen los componentes principales del laminador que son el motor y los rodillos de laminación.

CONCLUSIONES

Conclusiones

El desarrollo de esta memoria implicó los conocimientos adquiridos durante la formación profesional de la carrera, en donde se aplicó la teoría de resistencia de materiales para caracterizar el material, diseño de máquinas para la selección y dimensionamiento de componentes, dibujo técnico para la creación del boceto formato CAD y la creación de los planos de fabricación, mecánica computacional para el estudio del análisis de cargas, automatización industrial para la selección de componentes y la no menos importante sistemas sin arranque de virutas que permite entender el concepto básico de la laminación.

La laminadora puede deformar a los aluminios estudiados, pero no en todas las canaletas siendo el aluminio 2024-T4 el que no se puede deformar en la canaleta de 10 mm. Los máximos porcentajes de trabajo en frío se logran con el aluminio 1100-O y 6061-O que llegan en las canaletas inferiores a 10 mm valores cercanos al 100% y esto se debe a que tienen los menores coeficientes de dureza entre los materiales estudiados. Si las reducciones son inferiores a 1 mm se comenzaría a evaluar en realizar algún otro tratamiento ya sea un pulido superficial o un maquinado, que dada esta condición en la laminación no se aprovecha al máximo el torque entregado por el motor eléctrico.

La validación de los materiales seleccionados se obtuvo con la simulación en ANSYS en donde el factor de seguridad de cada componente crítico fue satisfactorio, cabe destacar que se consideró la laminación en un extremo del rodillo siendo lo máximo que podría resistir un apoyo, mientras que en la realidad la carga de laminación se distribuye de mejor manera entre las reacciones de los cojinetes aumentando el factor.

Los planos de fabricación fueron obtenidos para que una persona con conocimientos y experiencia en metalurgia puede fabricar el laminador, la complejidad de fabricación es la precisión necesaria para que al momento de ensamblar los componentes entren fácilmente. Al momento de soldar la materia prima cambia sus dimensiones en donde podría requerir una corrección para facilitar el ensamble. Los soportes pueden ser realizados en la universidad considerando la maquinaria existente en el taller.

Conclusiones

Con respecto a los costos pueden variar ya que todos son considerados con I.V.A y las cotizaciones fueron realizadas de manera a lo que permite la situación actual del país, además existen casas comerciales que venden el material dimensionado evitando la compra del material con dimensiones comerciales. El costo total del proyecto es de \$195.147 pesos chilenos siendo un valor accesible para su fabricación, los costos de mano de obra e ingeniería no son aplicables como se realizará para la universidad y en la universidad.

En conclusión, el laminador puede ser fabricado en la universidad en donde la compra de los componentes puede verse afectado, pero se pueden utilizar alternativas que se encuentren en el mercado nacional solo cumpliendo con los requisitos propuestos a lo largo del desarrollo. Esta memoria es el primer paso para un estudio más profundo en la deformación de manera microestructural y macroestructural, en donde la temperatura puede jugar un papel fundamental en la deformación y la aleación del material que se quiere deforma realizando simulaciones con programas de elementos finitos y matemáticos.

Finalizando las conclusiones, el motor que dispone la universidad para el laminador es de poca capacidad, frente a un aluminio 2024-T4 que es el que tiene mayor dureza no es capaz de deformar en la canaleta de 10 mm, además generalizando los porcentajes de trabajo son relativamente bajos con reducciones máximas de 3 mm, pero este problema se puede solucionar cambiando el motor, que gracias a la forma en que fue diseñado el laminador se podría acoplar un motor de mayores capacidades al laminador.

REFERENCIAS

- [1] Dieter, G.E.(1967).Dieter-Metalúrgica Mecánica. (F. Muñoz del Corraal (ed)).
- [2]Enríquez Berciano, J. L., Tremps Guerra, E., Fernández Segovia, D., & de Elío de Bengy, S. (2010). Laminación. Universidad Politécnica de Madrid, 244.
- [3]Sánchez Reinoso, H. T. (2003). Desarrollo e integración de métodos de análisis de sistemas de sujeción en máquinas-herramientas [Horacio Tomás Sánchez Reinoso].
<https://doi.org/10.31428/10317/992>
- [4]Para, R., & Tiras, L. (2014). Escuela politécnica nacional.
- [5]Zorc, M., Nagode, A., Bizjak, M., & Zorc, B. (2019). Decarburization of the Carbon Steel C45 During Annealing in Air. *Materials and Geoenvironment*, 65(4), 167–178.
<https://doi.org/10.2478/rmzmag-2019-0005>
- [6]KRAR, S., & CHECK, A. (2005). *Tecnología De Las Maquinas Herramientas* (p. 881).
- [7]Gerling, H. (2006). *Alrededor de la Máquina-Herramienta* (p.285).
- [8] Hibbeler, R. C. (2011). *Mecánica De Materiales Octava Edición*. In Pearson Education.
- [9]Hans, A., Kurt, F., Alfred, R., & Paul, S. (1985). *Tecnología De Los Metales* (p. 403).
- [10] Groover, M. P. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*.
- [11] Aparicio, G., Armas, H. D., & Ciaccia, M. (2007). Comportamiento elastoplástico en tracción de láminas de acero ASTM A-569. *Revista INGENIERÍA UC*, 14(1), 57–63.

Referencias

[12] Schmid, S. K. S. R. (n.d.). Manufactura, Ingeniería y Tecnología.

ANEXO 1: RESULTADOS OBTENIDOS DE MANERA ITERATIVA

Canaleta de 10 mm de diámetro final

Anexo 1.0.1 Resultados obtenidos de la canaleta de diámetro final de 10 mm para el aluminio 1100-O

Aluminio 1100-O		
Diámetros (mm)	Porcentaje de trabajo en frío (%)	Torque utilizado (N*m)
5,5	0,19	19,79
6	0,36	56,71
6,5	0,52	95,65
7	0,67	139,85
7,5	0,81	189,01
8	0,94	242,95
8,5	1,06	301,57

Anexo 1.2 Resultados obtenidos de la canaleta de diámetro final de 10 mm para el aluminio 2024-T4

Aluminio 2024-T4		
Diámetros (mm)	Porcentaje de trabajo en frío (%)	Torque utilizado (N*m)
5,5	0,19	83,84
6	0,36	203,83
6,5	0,52	339,83
7	0,67	493,34
7,5	0,81	663,47
8	0,94	849,73
8,5	1,06	1051,86

Anexos

Anexo 1.3 Resultados obtenidos de la canaleta de diámetro final de 10 mm para el aluminio 6061-O

Aluminio 6061-O		
Diámetros (mm)	Porcentaje de trabajo en frío (%)	Torque utilizado (N*m)
5,5	0,19	22,53
6	0,36	53,75
6,5	0,52	90,66
7	0,67	132,57
7,5	0,81	179,18
8	0,94	230,32
8,5	1,06	285,89

Anexo 1.4 Resultados obtenidos de la canaleta de diámetro final de 10 mm para el aluminio 6061-T6

Aluminio 6061-T6		
Diámetros (mm)	Porcentaje de trabajo en frío (%)	Torque necesario (N*m)
5,5	0,19	66,04
6	0,36	142,94
6,5	0,52	228,27
7	0,67	321,57
7,5	0,81	422,63
8	0,94	531,35
8,5	1,06	647,67

Anexos

Anexo 1.5 Resultados obtenidos de la canaleta de diámetro final de 10 mm para el aluminio 7075-O

Aluminio 7075-O		
Esfuerzo (Mpa)	Porcentaje de trabajo en frío (%)	Torque necesario (N*m)
5,5	0,19	47,39
6	0,36	110,88
6,5	0,52	184,98
7	0,67	268,48
7,5	0,81	360,84
8	0,94	461,78
8,5	1,06	571,13

Anexo 1.5 Resultados obtenidos de la canaleta de diámetro final de 10 mm para el aluminio 7075-O

Resultados de la canaleta de 6 mm de diámetro final

Anexo 1.6 Resultados obtenidos de la canaleta de diámetro final de 6 mm para el aluminio 7075-O

Aluminio 1100-O		
Diámetros (mm)	Porcentaje de trabajo en frío (%)	Torque utilizado (N*m)
6,5	0,16	22,75
7	0,31	73,81
7,5	0,45	123,78
8	0,58	180,07
8,5	0,70	242,21
9	0,81	309,94
9,5	0,92	383,11
10	1,02	461,62

Anexos

*Anexo 1.7 Resultados obtenidos de la canaleta de diámetro final de 6 mm para el aluminio
2024-T4*

Aluminio 2024-T4		
Diámetros (mm)	Porcentaje de trabajo en frío (%)	Torque utilizado (N*m)
6,5	0,16	97,06
7	0,31	240,89
7,5	0,45	398,93
8	0,58	575,56
8,5	0,70	769,62
9	0,81	980,46
9,5	0,92	1207,69
10	1,02	1451,05

*Anexo 1.8 Resultados obtenidos de la canaleta de diámetro final de 6 mm para el aluminio
6061-O*

Aluminio 6061-O		
Diámetros (mm)	Porcentaje de trabajo en frío (%)	Torque utilizado (N*m)
6,5	0,16	25,91
7	0,31	61,43
7,5	0,45	103,04
8	0,58	149,90
8,5	0,70	201,63
9	0,81	258,02
9,5	0,92	318,94
10	1,02	384,31

Anexos

Anexo 1.9 Resultados obtenidos de la canaleta de diámetro final de 10 mm para el aluminio 6061-T6

Aluminio 6061-T6		
Diámetros (mm)	Porcentaje de trabajo en frío (%)	Torque utilizado (N*m)
6,5	0,16	77,94
7	0,31	167,52
7,5	0,45	265,81
8	0,58	372,24
8,5	0,70	486,54
9	0,81	608,59
9,5	0,92	738,29
10	1,02	875,60

Anexo 1.10 Resultados obtenidos de la canaleta de diámetro final de 6 mm para el aluminio 7075-O

Aluminio 7075-O		
Diámetros (mm)	Porcentaje de trabajo en frío (%)	Torque utilizado (N*m)
6,5	0,16	54,77
7	0,31	127,35
7,5	0,45	211,25
8	0,58	304,99
8,5	0,70	407,90
9	0,81	519,62
9,5	0,92	639,90
10	1,02	768,61

Resultados de la canaleta de 10 mm de diámetro final

Anexo 1.11 Resultados obtenidos de la canaleta de diámetro final de 10 mm para el aluminio 1100-O

Aluminio 1100-O		
Diámetros (mm)	Porcentaje de trabajo en frío (%)	Torque utilizado (N*m)
10,5	0,10	33,79
11	0,19	108,31
11,5	0,28	179,55
12	0,36	258,32
12,5	0,45	343,85
13	0,52	435,65
13,5	0,60	533,44
14	0,67	637,01

Anexo 1.12 Resultados obtenidos de la canaleta de diámetro final de 10 mm para el aluminio 2024-T4

Aluminio 2024-T4		
Diámetros (mm)	Porcentaje de trabajo en frío (%)	Torque utilizado (N*m)
10,5	0,10	147,06
11	0,19	389,13
11,5	0,28	635,33
12	0,36	904,46
12,5	0,45	1194,24
13	0,52	1503,38
13,5	0,60	1831,01
14	0,67	2176,57

Anexos

Anexo 1.13 Resultados obtenidos de la canaleta de diámetro final de 10 mm para el aluminio 6061-O

Aluminio 6061-O		
Diámetros (mm)	Porcentaje de trabajo en frío (%)	Torque utilizado (N*m)
10,5	0,10	38,48
11	0,19	90,14
11,5	0,28	149,44
12	0,36	215,01
12,5	0,45	286,21
13	0,52	362,64
13,5	0,60	444,06
14	0,67	530,28

Anexo 1.14 Resultados obtenidos de la canaleta de diámetro final de 10 mm para el aluminio 6061-T6

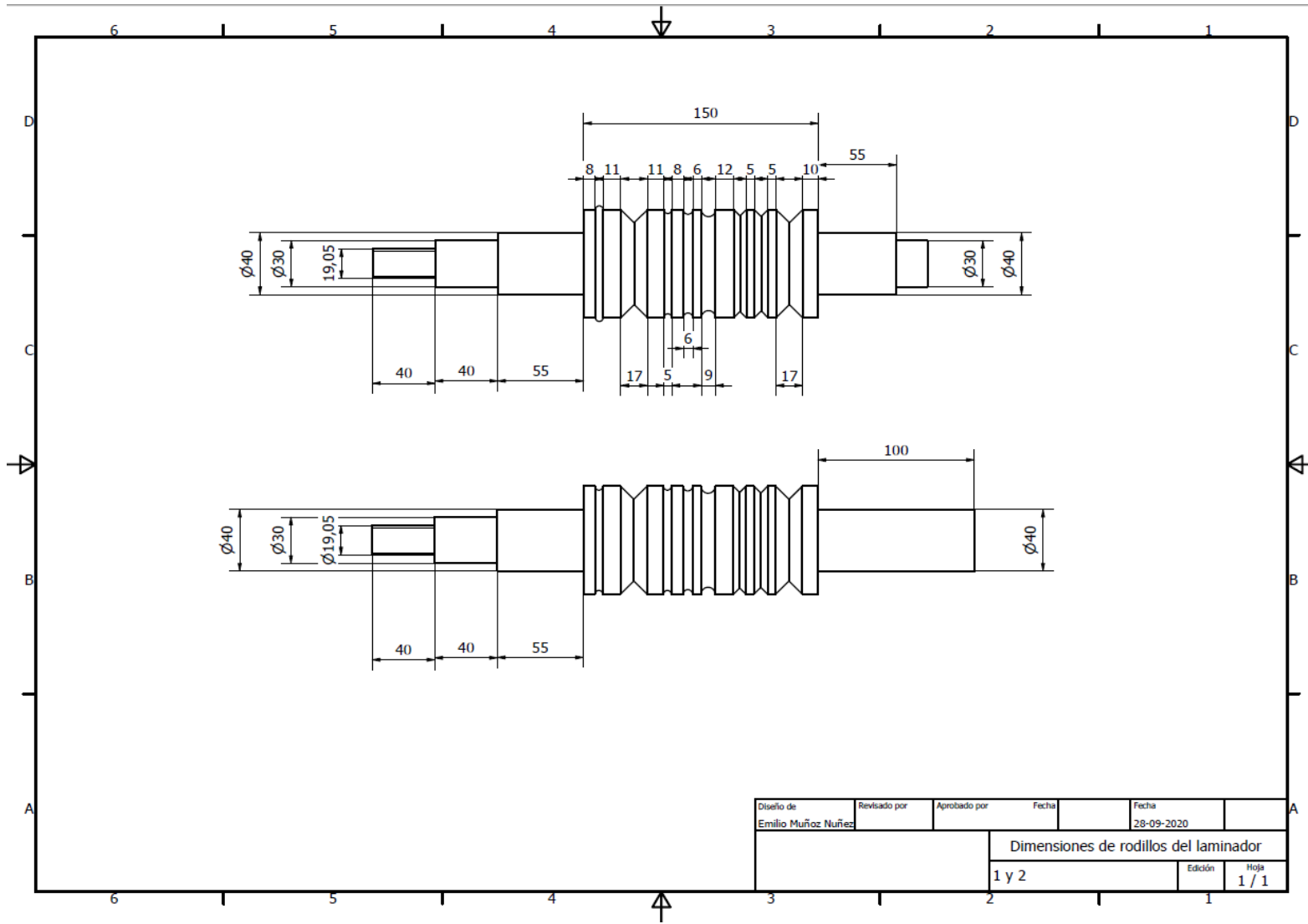
Aluminio 6061-T6		
Diámetros (mm)	Porcentaje de trabajo en frío (%)	Torque utilizado (N*m)
10,5	0,10	124,70
11	0,19	264,17
11,5	0,28	413,54
12	0,36	571,75
12,5	0,45	738,36
13	0,52	913,08
13,5	0,60	1095,76
14	0,67	1286,27

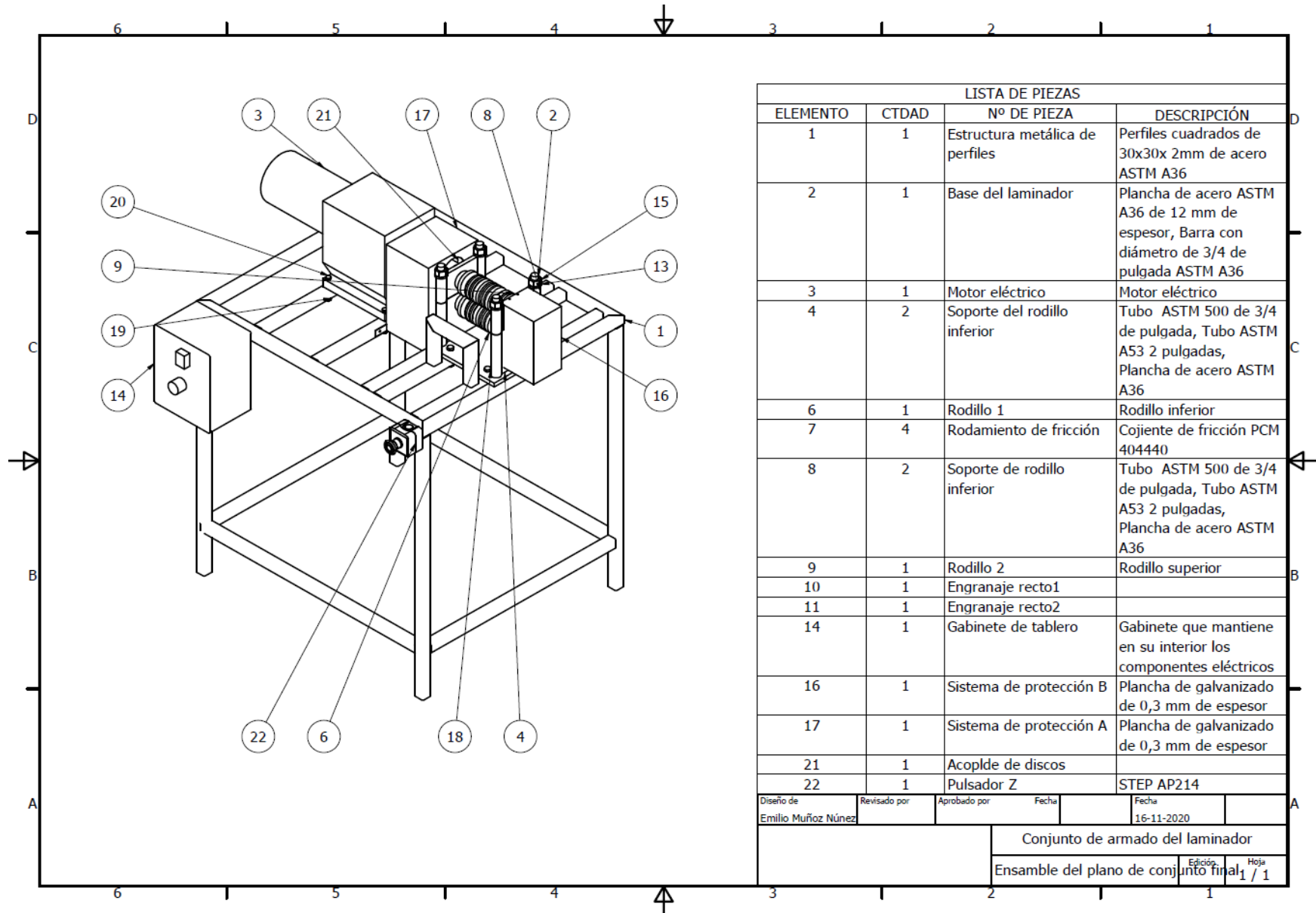
Anexos

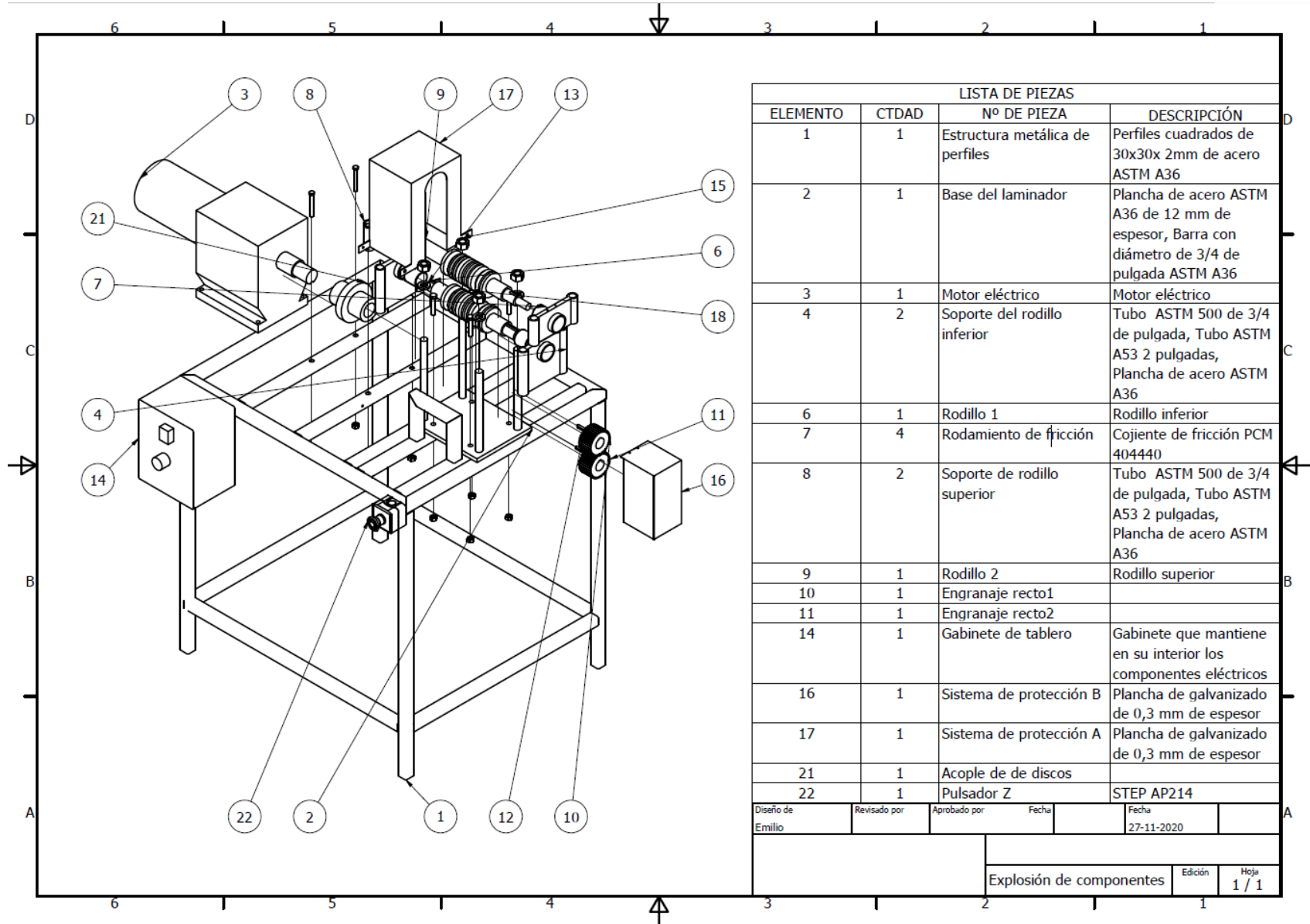
*Anexo 1.15 Resultados obtenidos de la canaleta de diámetro final de 10 mm para el aluminio
7075-O*

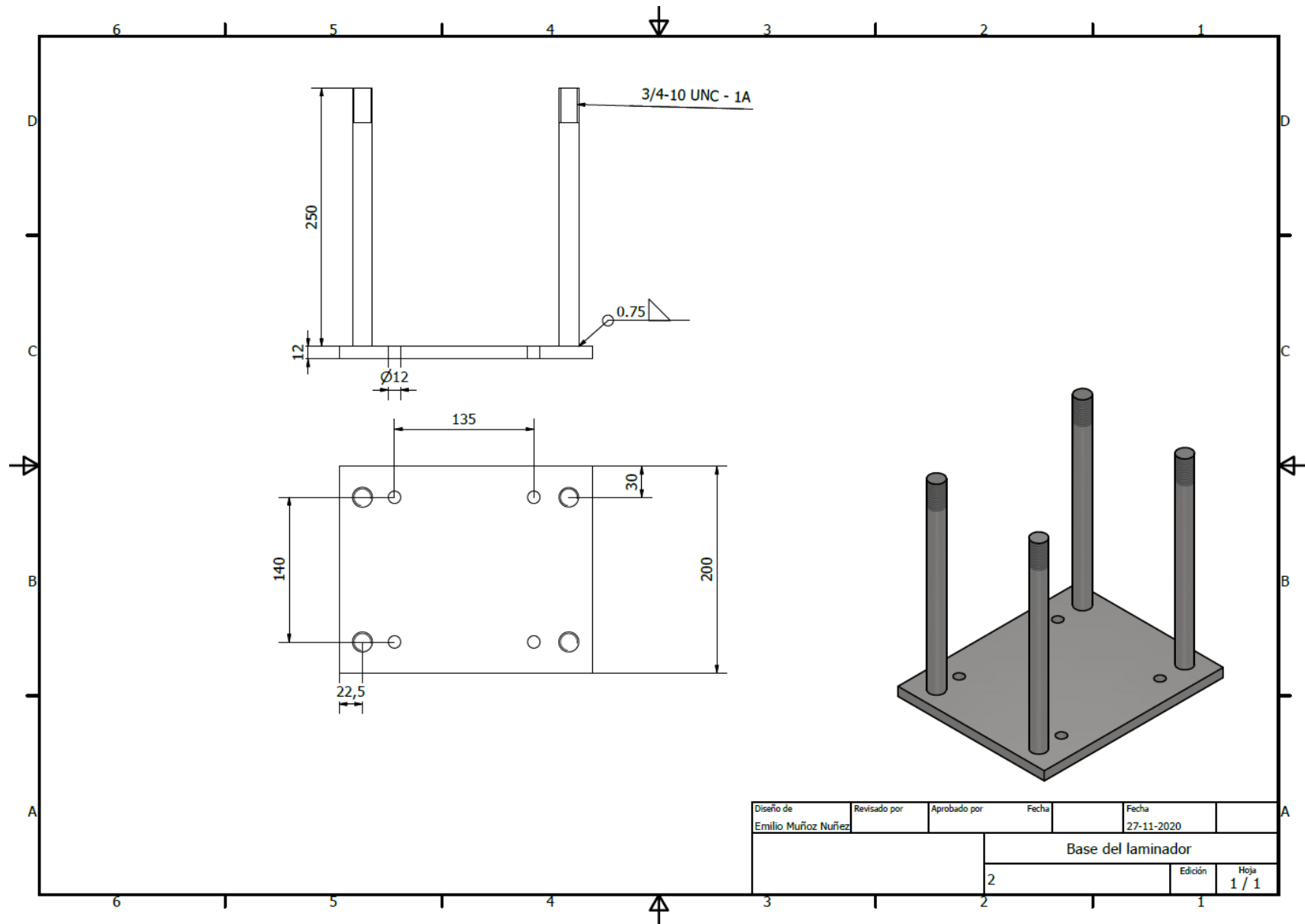
Aluminio 7075-O		
Diámetros (mm)	Porcentaje de trabajo en frío (%)	Torque necesario (N*m)
10,5	0,10	82,58
11	0,19	189,58
11,5	0,28	310,72
12	0,36	443,52
12,5	0,45	586,81
13	0,52	739,91
13,5	0,60	902,38
14	0,67	1073,91

ANEXO 2 PLANOS DE FABRICACIÓN

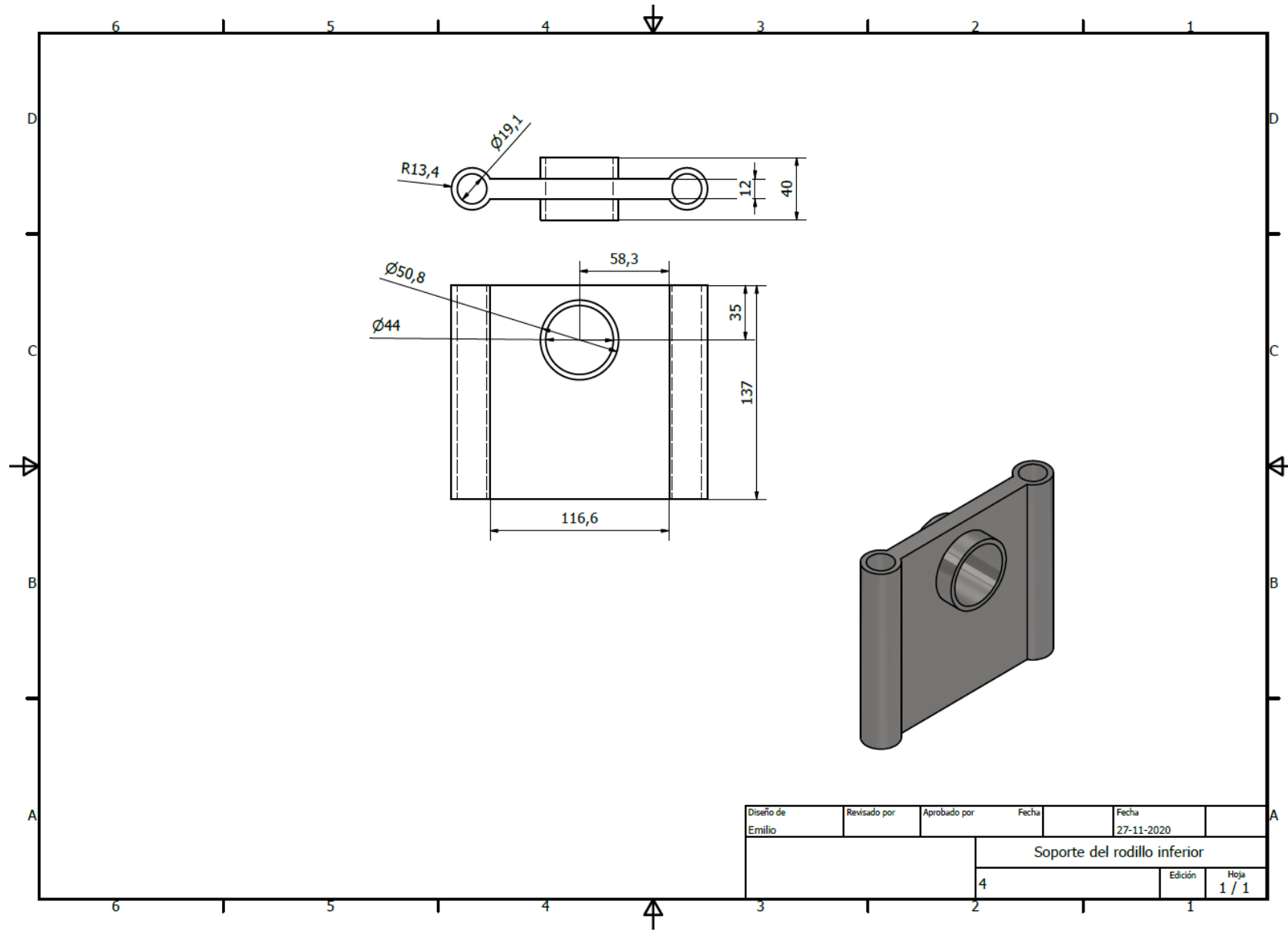


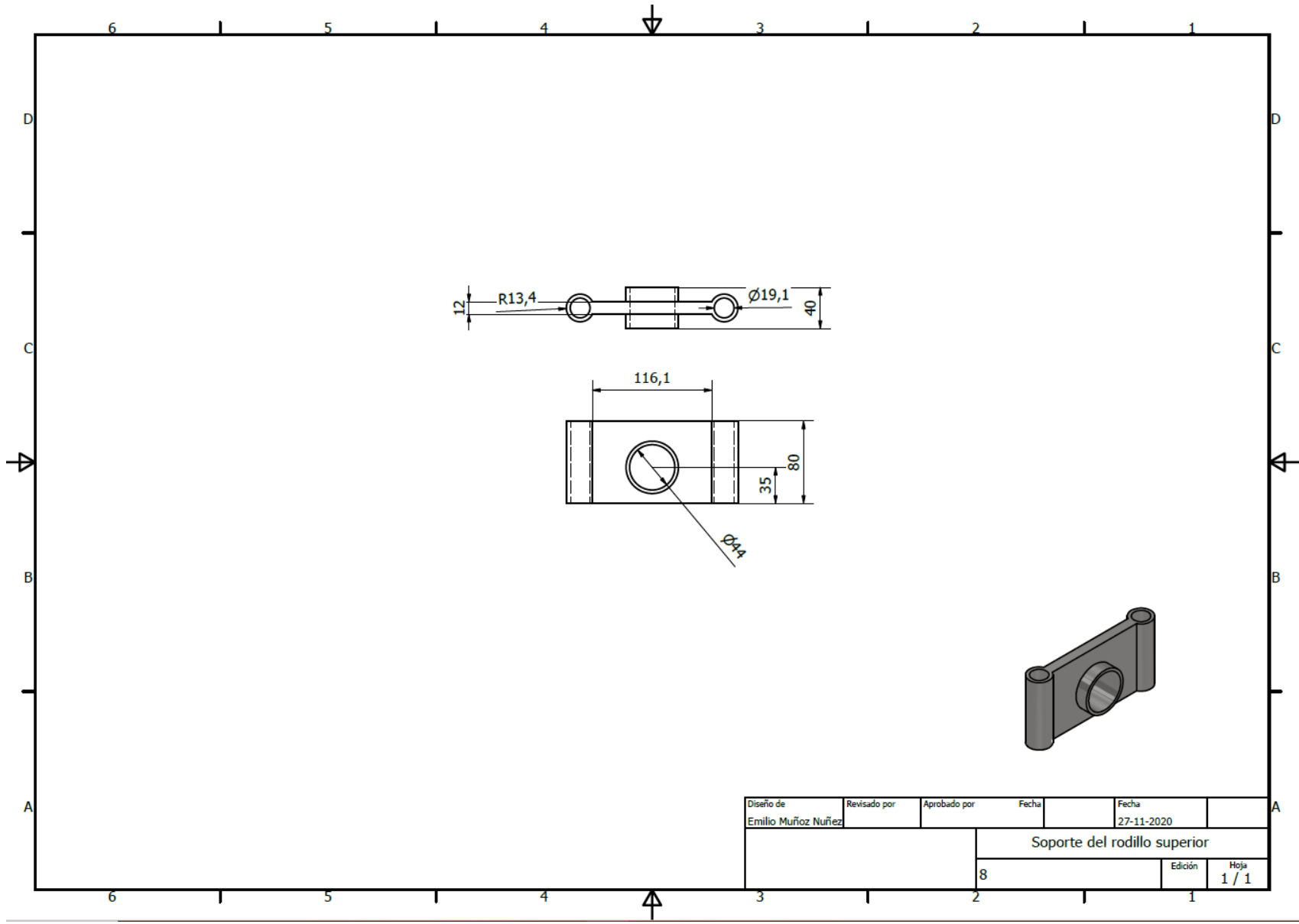


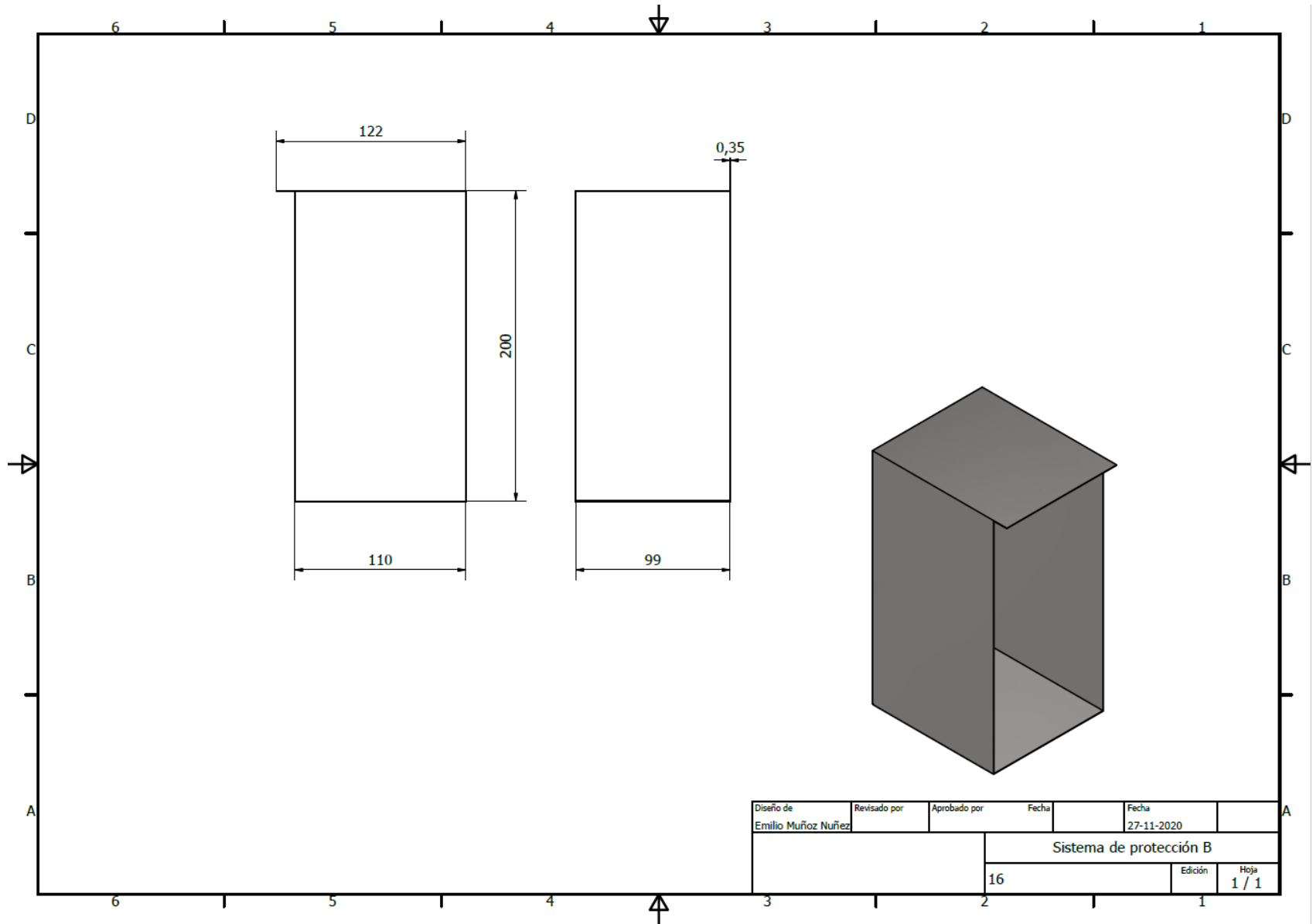


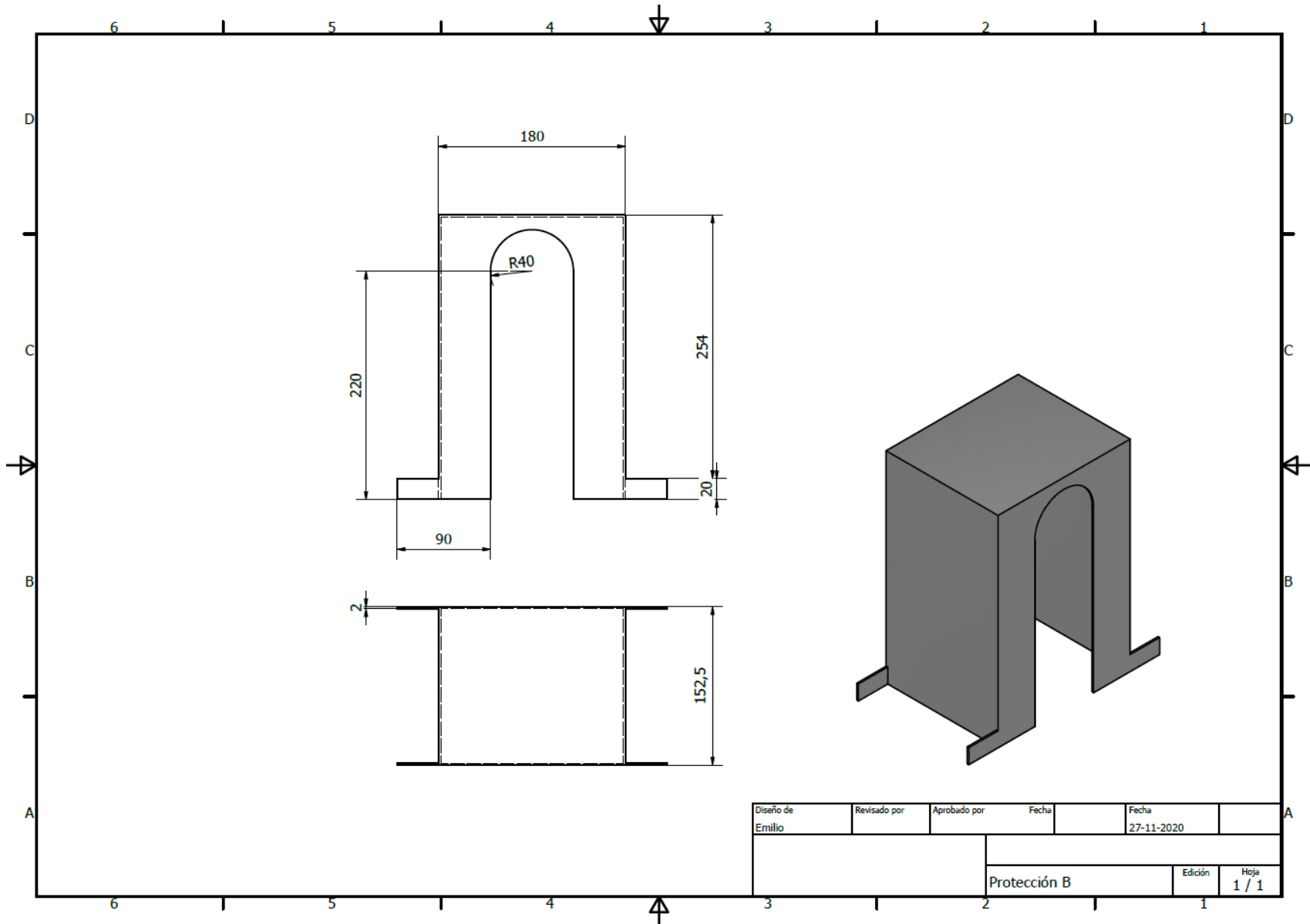


Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha
Emilio Muñoz Nuñez				27-11-2020
			Base del laminador	
			Edición	Hoja
			2	1 / 1

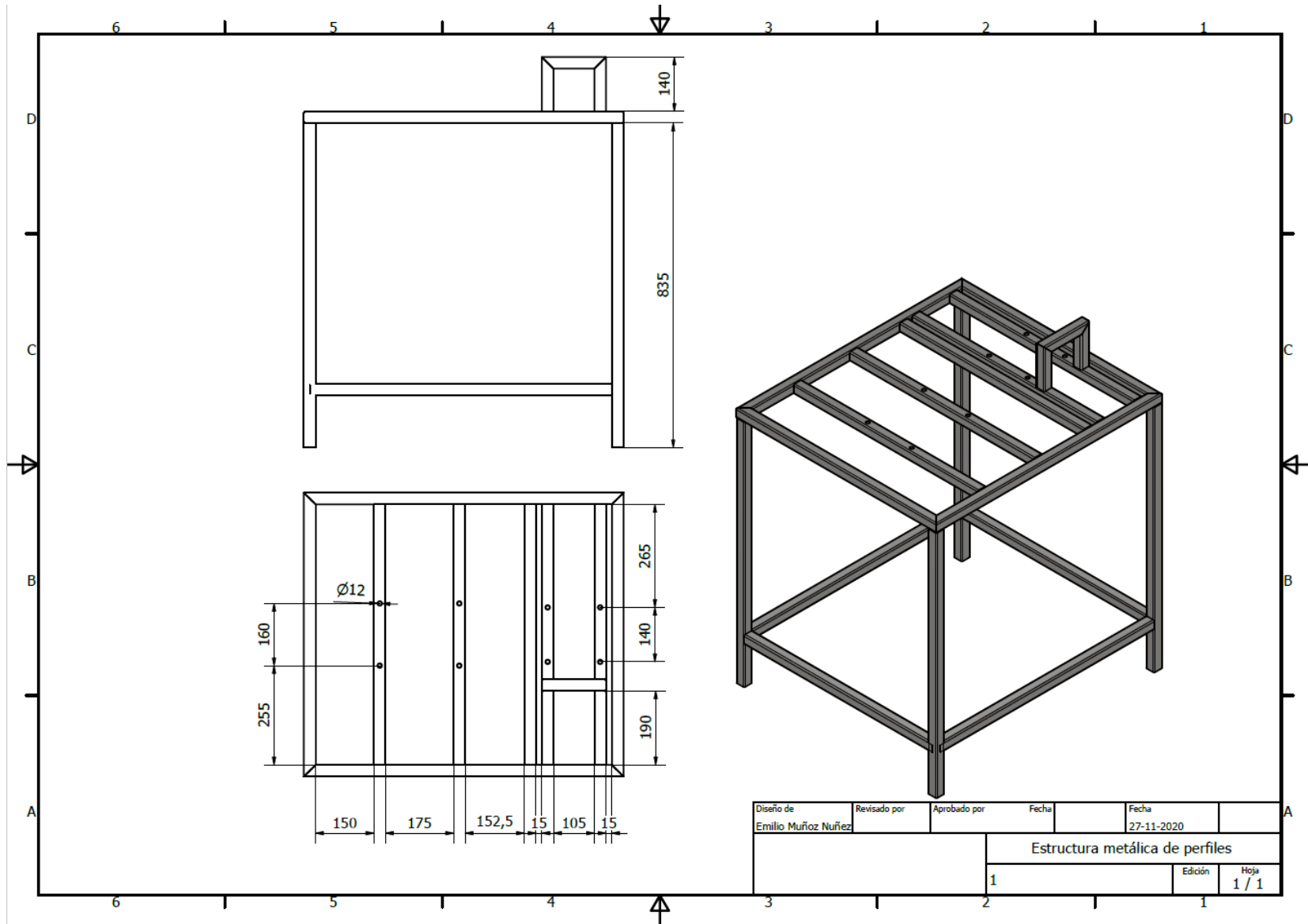






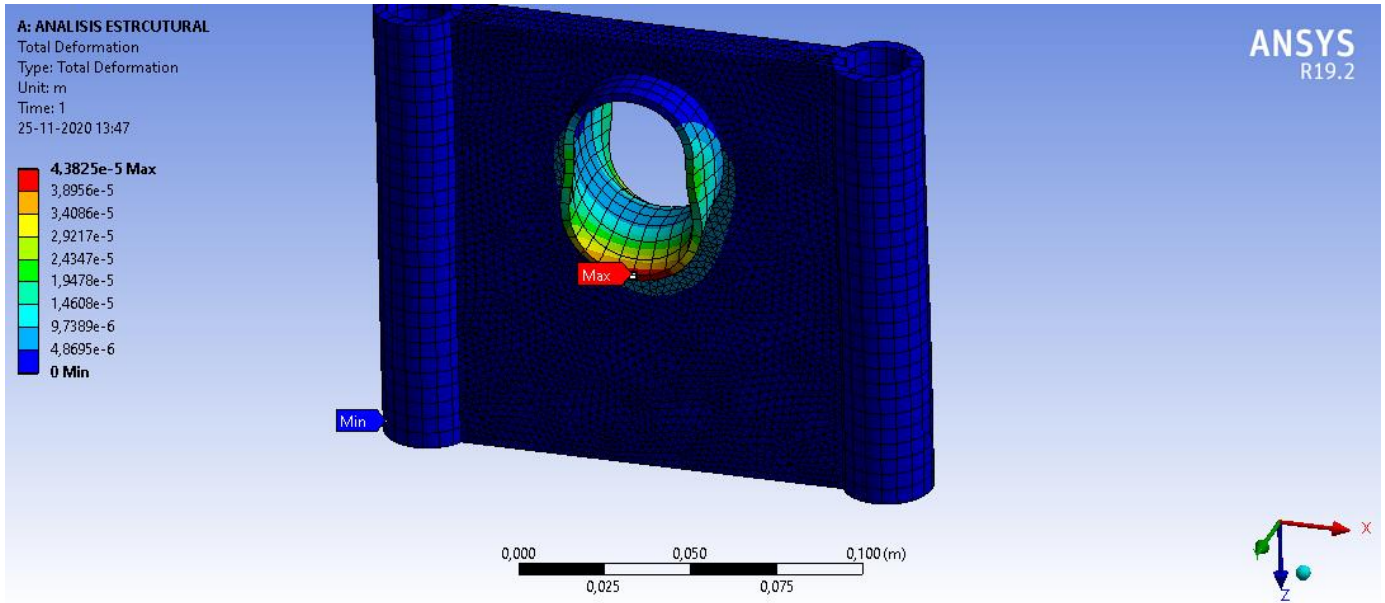


Diseño de Emilio	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 27-11-2020	
			Protección B		Edición Hoja 1 / 1

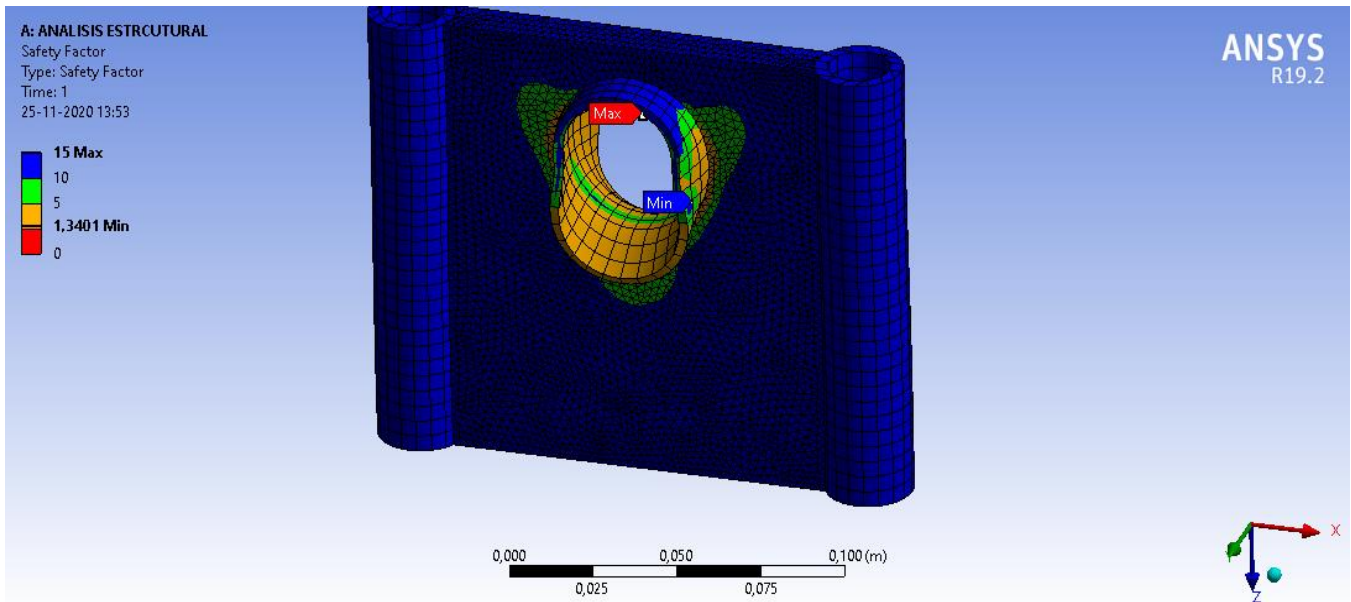


ANEXO 3: RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CARGA

Resultados del análisis en ANSYS del soporte inferior



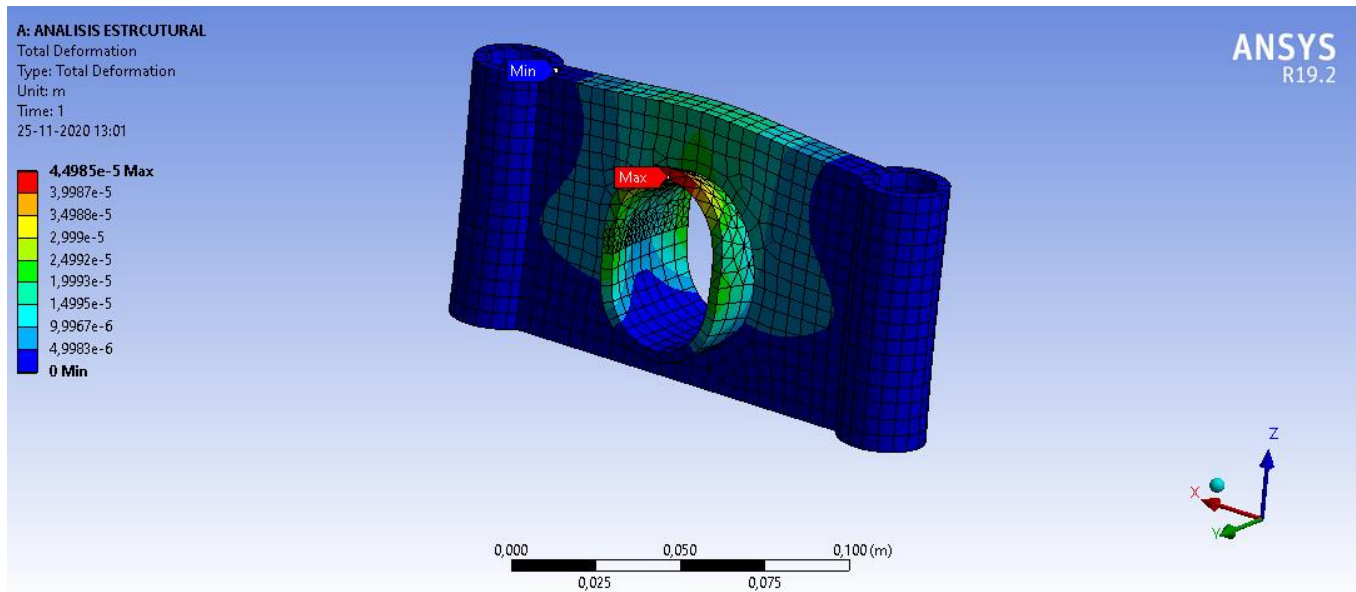
Anexo 3.1 Deformación máxima del soporte inferior realizada en ANSYS. Fuente: elaboración propia



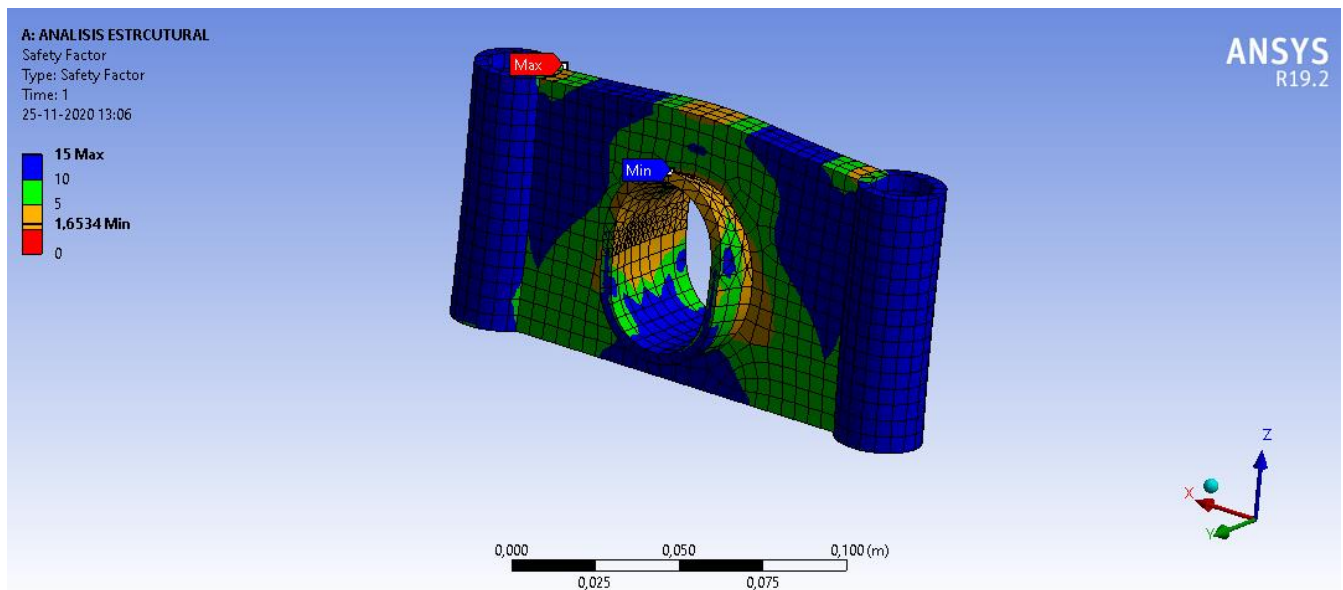
Anexo 3.1 Coeficiente de seguridad del soporte inferior realizada en ANSYS. Fuente: elaboración propia

Anexos

Resultados del análisis en ANSYS del soporte superior

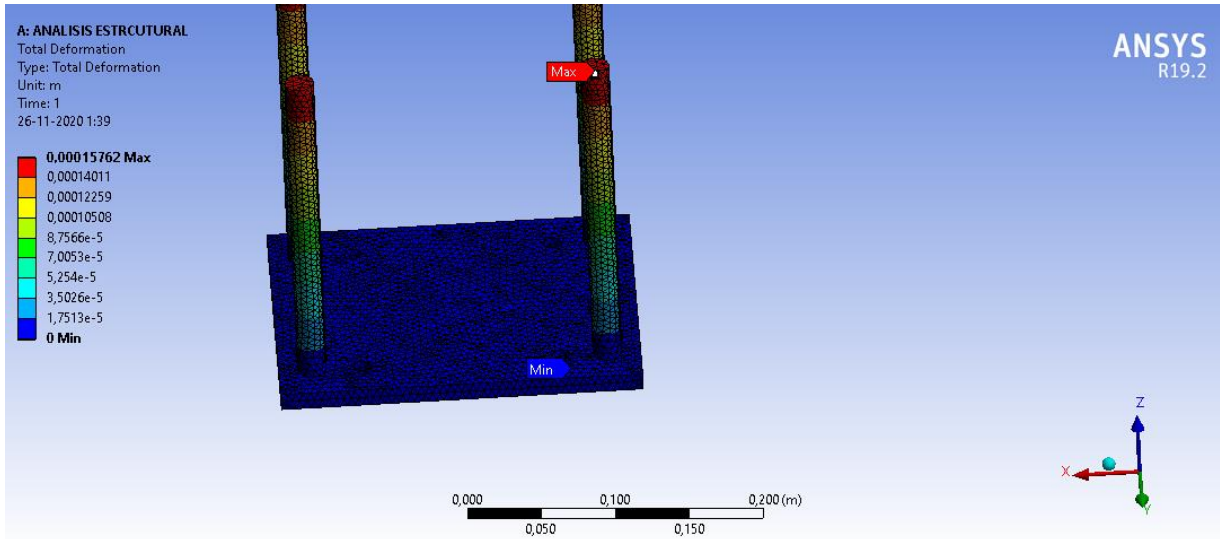


Anexo 3.3 Deformación máxima del soporte superior realizada en ANSYS. Fuente: elaboración propia



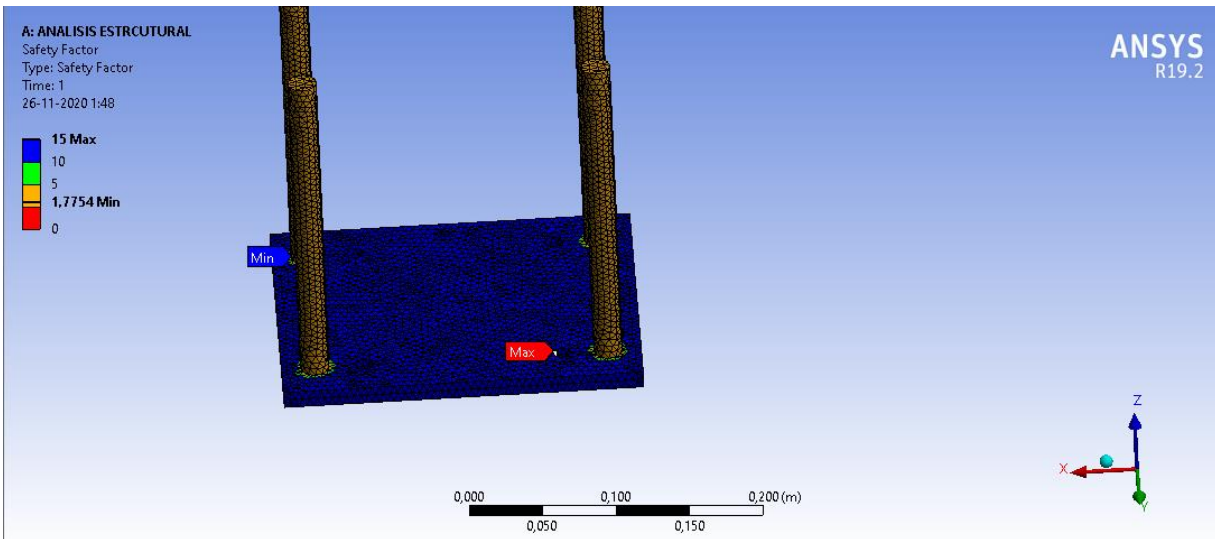
Anexo 3.4 Coeficiente de seguridad del soporte superior realizada en ANSYS. Fuente: elaboración propia

Resultados del análisis en ANSYS de la base del laminador



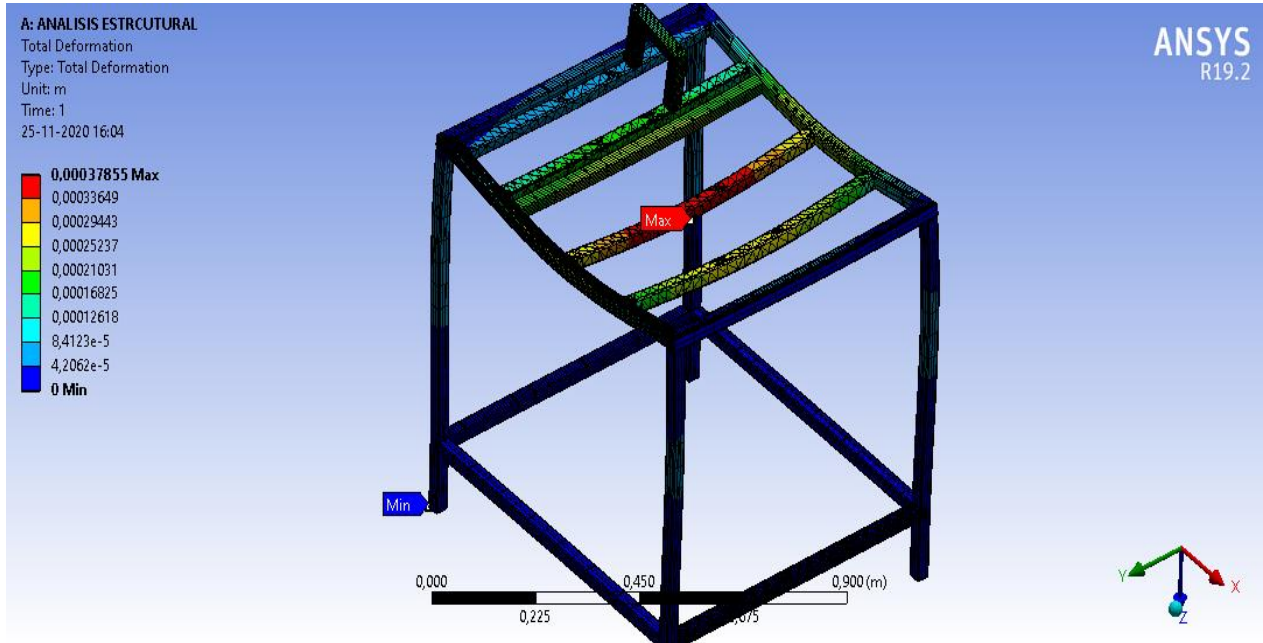
Anexo 3.5 Deformación máxima de la base del laminador soporte realizada en ANSYS.

Fuente: elaboración propia



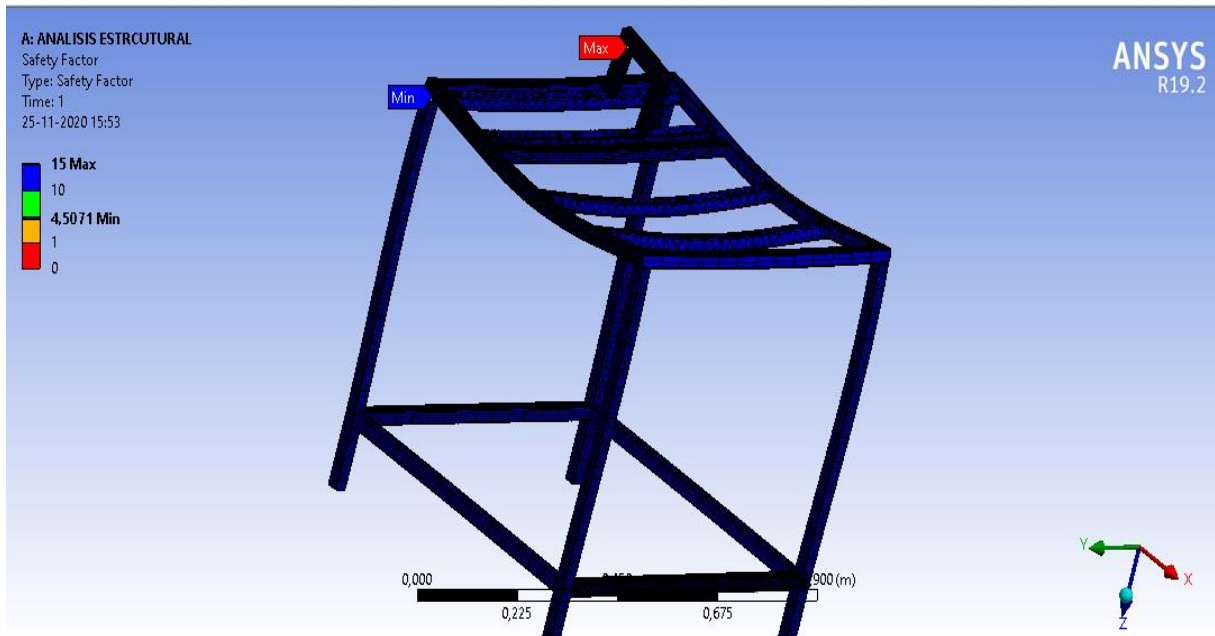
Anexo 3.6 Coeficiente de seguridad de la base del laminador realizada en ANSYS. Fuente: elaboración propia

Resultados del análisis en ANSYS de la estructura de perfiles



Anexo 3.7 Deformación máxima de la estructura metálica de perfiles realizada en ANSYS.

Fuente: elaboración propia



Anexo 3.8 Coeficiente de seguridad de la estructura metálica de perfiles realizada en ANSYS.

Fuente: elaboración propia

ANEXO 4: DETALLE DE LOS COSTOS

Detalle de costos de materia prima

Tabla 4.0.1 Detalle de los costos de la materia prima. Fuente: elaboración propia

Componente	Descripción	Cantidad	Precio unitario	Total
Plancha de acero ASTM A36	Plancha de Acero Gruesa ASTM A36 de 12mm espesor x 2m ancho y 3m largo	8 kg	\$529.223	\$14700
Perfil cuadrado 30x30x2 mm	30x30x2 mm x 6 mt Tubo Galvanizado Cuadrado	1	\$11.450	\$11450
Bara de SAES 43440	Alta resistencia a la tracción AISI SAE 4340 barra redonda de acero de aleación proveedor precio por kg	1	\$38.315	\$11440
Perfil tubular redondo	Tubo redondo ASTM A500TUBO (25.40MM) X 1.5MM	1	\$6.437	\$6437
Tubo acero ASTM A53	Cañería ASTM A53 48,3 diámetro exterior y espesor de 3,68 mm	1	\$24580	\$7374
Plancha zinc	Plancha zinc de dimensiones de 0,3x950x3000 mm	1	\$11190	\$11190
			Total	\$62591

Tabla 4.2 Detalle de los costos de los componentes normalizados. Fuente: elaboración propia

Componentes	Descripción	cantidad	Precio unitario	Precio total
Caja de componentes	Gabinete tablero metálico 250x200x150 IP65	1	\$17990	\$17990
Guardamotor	Disyuntor, relé de sobrecarga	1	\$16990	\$16990

Anexos

Pulsador de emergencia	Pulsador Parada De Emergencia 22 mm Rojo 1Nc Girar para Desenclavar-Bm Electric	1	\$3556	\$3556
Pulsador	Pulsador Partir-parar 22mm Verde 1Na Ip66	1	\$16990	\$16990
Contactador	Contactador 3 polos - 12A - 220V AC - NANC Schneider	1	\$ 47890	\$47890
Enchufe macho	Enchufe Macho Volante 3P+T 32A 380V IP67	1	\$2990	\$2990
Acople de transmisión	Acople de discos GTR/S	1	\$26150	\$26150
			Total	\$132556

ANEXO 5: CATÁLOGOS DE FABRICACIÓN

Peso plancha

Espesor (mm.) x Ancho (mt.) x Largo (mt.) x 8 = Peso (kg.)

Plancha Laminada en Caliente ASTM A36

Código SAP	Glosa	UM	Kg/pl
32088	Pl Laminada en Caliente 2,0 x 1000 x 3000 mm.	CU	48
32096	Pl Laminada en Caliente 2,5 x 1000 x 3000 mm.	CU	60
32104	Pl Laminada en Caliente 3,0 x 1000 x 3000 mm.	CU	72
32105	Pl Laminada en Caliente 3,0 x 1000 x 6000 mm.	CU	144
32108	Pl Laminada en Caliente 3,0 x 1500 x 3000 mm.	CU	108
32109	Pl Laminada en Caliente 3,0 x 1500 x 6000 mm.	CU	216
32112	Pl Laminada en Caliente 4,0 x 1000 x 3000 mm.	CU	96
32113	Pl Laminada en Caliente 4,0 x 1000 x 6000 mm.	CU	192
32116	Pl Laminada en Caliente 4,0 x 1500 x 3000 mm.	CU	141
32117	Pl Laminada en Caliente 4,0 x 1500 x 6000 mm.	CU	283
32120	Pl Laminada en Caliente 5,0 x 1000 x 3000 mm.	CU	120
32121	Pl Laminada en Caliente 5,0 x 1000 x 6000 mm.	CU	240
32124	Pl Laminada en Caliente 5,0 x 1500 x 3000 mm.	CU	177
32125	Pl Laminada en Caliente 5,0 x 1500 x 6000 mm.	CU	353
32128	Pl Laminada en Caliente 6,0 x 1000 x 3000 mm.	CU	144
32129	Pl Laminada en Caliente 6,0 x 100 x 6000 mm.	CU	288
32132	Pl Laminada en Caliente 6,0 x 1500 x 3000 mm.	CU	212
32133	Pl Laminada en Caliente 6,0 x 1500 x 6000 mm.	CU	424
32136	Pl Laminada en Caliente 8,0 x 1000 x 3000 mm.	CU	192
32137	Pl Laminada en Caliente 8,0 x 1000 x 6000 mm.	CU	384
32144	Pl Laminada en Caliente 10 x 1000 x 3000 mm.	CU	240
32145	Pl Laminada en Caliente 10 x 1000 x 6000 mm.	CU	480
32152	Pl Laminada en Caliente 12 x 1000 x 3000 mm.	CU	288
32153	Pl Laminada en Caliente 12 x 1000 x 6000 mm.	CU	576

Anexo 5.1 Propiedades de la plancha ASTM A36. Fuente: extraído el 18 de octubre del 2020, www.prodalam.cl

Anexos

Diámetro Nominal (pulg)	Diámetro Exterior (mm)	Schedule (Sch)	Espesor Nominal (mm)	Peso Teórico (kg/m)	Presión de Prueba (psi)
1/2"	21,34	Sch 40 /STD	2,77	1,27	700
3/4"	26,67	Sch 40 /STD	2,87	1,69	700
1"	33,40	Sch 40 /STD	3,38	2,50	700
1 1/4"	42,16	Sch 40 /STD	3,56	3,39	1.300
1 1/2"	48,26	Sch 40 /STD	3,68	4,05	1.300
2"	60,32	Sch 40 /STD	3,91	5,44	2.500
2 1/2"	73,02	Sch 40 /STD	5,16	8,63	2.500
3"	88,90	Sch 40 /STD	5,49	11,29	2.500
4"	114,30	Sch 40 /STD	6,02	16,07	2.210
5"	141,30	Sch 40 /STD	6,55	21,77	1.950
6"	168,27	-	5,00	19,27	1.190
6"	168,27	-	6,35	25,36	1.580
6"	168,27	Sch 40 /STD	7,11	28,26	1.780

Anexo 5.2 Propiedades del tubo ASTM A36. Fuente: extraído el 18 de octubre del 2020,

www.prodalam.cl



ASTM A 36 es un acero estructural de mediana resistencia y buenas propiedades de soldabilidad. Presenta un esfuerzo de fluencia de 250 MPa (36 ksi) y un esfuerzo mínimo tracción de 400 a 550 MPa (58 a 80 ksi). Se desarrolló para la fabricación de estructuras remachadas, atornilladas y soldadas, mejorando el contenido de carbono de los aceros ASTM A7.



Kupfer ofrece distintos diámetros para las necesidades del cliente y los identifica con el color naranja.

Cumple con la norma ASTM A6

APLICACIONES

Las barras ASTM A36 son requeridas en la industria de la construcción en general. Se utilizan en piezas mecanizadas, para componentes de mediana-baja resistencia. Ejes, pernos de anclaje bajo ASTM 1554 Gr 36, pernos ASTM A307 Grado A-C o ASTM F1568 M clase 4,6, remaches sobre ASTM A502 Gr 1 y tuercas ASTM A563 son algunos ejemplos.

PROPIEDADES

Composición Química (% en peso)

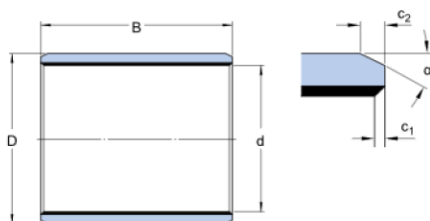
Diámetro [in]	C	Mn	P	S	Si	Cu
$\Phi \leq 3/4$	$\leq 0,26$	-	$\leq 0,04$	$\leq 0,05$	$\leq 0,40$	$\geq 0,20$
$3/4 \leq \Phi \leq 1 \frac{1}{2}$	$\leq 0,27$	0,60-0,90	$\leq 0,04$	$\leq 0,05$	$\leq 0,40$	$\geq 0,20$
$1 \frac{1}{2} \leq \Phi \leq 4$	$\leq 0,28$	0,60-0,90	$\leq 0,04$	$\leq 0,05$	$\leq 0,40$	$\geq 0,20$
$\Phi \leq 4''$	$\leq 0,29$	0,60-0,90	$\leq 0,04$	$\leq 0,05$	$\leq 0,40$	$\geq 0,20$

Propiedades Mecánicas

Límite de [Mpa]	Resistencia a la tracción [Mpa]	Elongación [%] e:50mm
≥ 250	400-550	≥ 23

Anexo 5.3 Propiedades de la barra ASTM A36. Fuente: extraído el 10 de octubre del 2020,
www.kupfer.cl

Especificación técnica



DIMENSIONES

d	40 mm
D	44 mm
B	40 mm
c ₁	min. 0.1 mm
c ₁	max. 0.7 mm
c ₂	min. 0.8 mm
c ₂	max. 1.6 mm
α	±8 20 °

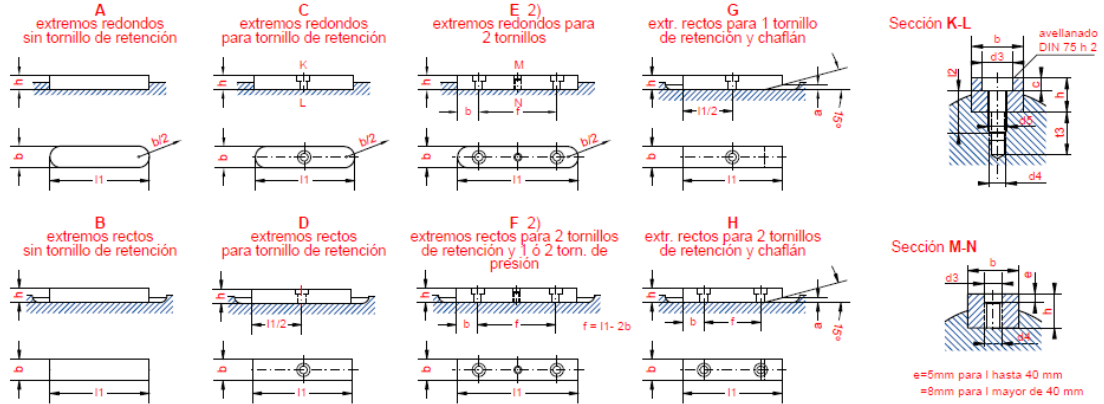
DATOS DEL CÁLCULO

Capacidad de carga dinámica básica, sentido radial	C	125 kN
Capacidad de carga estática básica, sentido radial	C ₀	390 kN
Factor de carga dinámica específica	K	80 N/mm
Factor de carga estática específica	K ₀	250 N/mm
Factor según el tipo de material y rodamiento	K _M	480
Velocidad admisible de deslizamiento	v	min. m/s
Velocidad admisible de deslizamiento	v	max. 2 m/s
Coefficiente de fricción	μ	min. 0.03
Coefficiente de fricción	μ	max. 0.25

*Anexo 5.4 Catálogo del PCM 404440 E. Fuente: extraído el 18 de octubre del 2020,
<https://www.skf.com/co/products/plain-bearings/bushings-thrust-washers-strips/bushings/productid-PCM%20404440%20E>*



Chavetas Paralelas DIN 6885

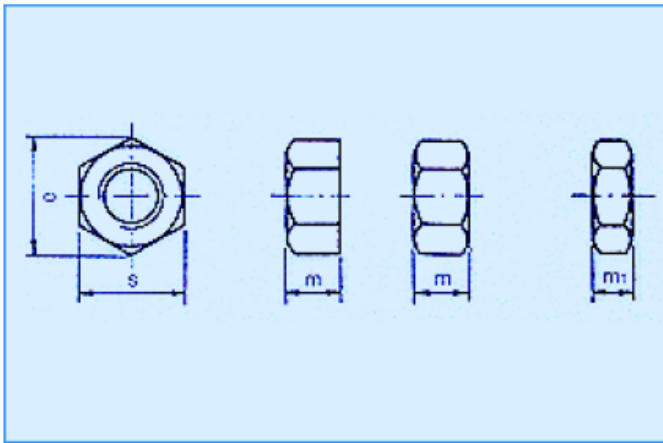


Sección de la lengüeta de ajuste (acero para chavetas DIN 6880)		Anchura b	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	25																	
Para diámetro del eje d1 3)		Altura h	2	3	4	3	5	4	6	5	7	6	8	6	9	7	10	7	11	8	12	9	14	9	14								
Chavetero del eje	Anchura b 4)	asiento fijo P9	Máxima	1,991	2,991	3,988	4,988	5,988	7,985	9,985	11,982	13,982	15,982	17,982	19,978	21,978	24,978	asiento fijo P9	Máxima	1,991	2,991	3,988	4,988	5,988	7,985	9,985	11,982	13,982	15,982	17,982	19,978	21,978	24,978
		asiento ligero N9	Mínima	1,966	2,966	3,958	4,958	5,958	7,949	9,949	11,939	13,939	15,939	17,939	19,926	21,926	24,926	asiento ligero N9	Mínima	1,966	2,966	3,958	4,958	5,958	7,949	9,949	11,939	13,939	15,939	17,939	19,926	21,926	24,926
	Profundidad t1 5)	con juego en el lomo o aprieto		1,1	1,7	2,4	1,9	2,9	2,5	3,5	3,1	4,1	3,7	4,7	3,9	4,9	4,0	5,5	4,7	6,2	4,8	6,8	5,4	7,4	6,0	8,5	6,2	8,7					
		dif. adm.		+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2					
Chavetero del cubo	Anchura b 4)	asiento fijo P9	Máxima	1,991	2,991	3,988	4,988	5,988	7,985	9,985	11,982	13,982	15,982	17,982	19,978	21,978	24,978	asiento fijo P9	Máxima	1,991	2,991	3,988	4,988	5,988	7,985	9,985	11,982	13,982	15,982	17,982	19,978	21,978	24,978
		asiento ligero N9	Mínima	1,966	2,966	3,958	4,958	5,958	7,949	9,949	11,939	13,939	15,939	17,939	19,926	21,926	24,926	asiento ligero N9	Mínima	1,966	2,966	3,958	4,958	5,958	7,949	9,949	11,939	13,939	15,939	17,939	19,926	21,926	24,926
	Profundidad t2 5)	con juego en el lomo		0,9	1,3	1,6	1,1	2,1	1,6	2,5	1,9	2,9	2,3	3,3	2,1	3,1	2,0	3,5	2,3	3,8	2,2	4,2	2,6	4,6	3,0	5,5	2,8	5,3					
		dif. adm.		+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2					
Redondeado del fondo del chavetero	r			0,2	0,2	0,4	0,2	0,4	0,4	0,4	0,6	0,4	0,6	0,4	0,6	0,4	0,6	0,4	0,6	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6						
		dif. adm.		-0,1	-0,1	-0,2	-0,1	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2					

Anexo 5.5 Chavetas con norma din 6865. Fuente: extraído el 10 de octubre del 2020,

<https://www.opac.net/pdf/DIN%206885%20A.pdf>

TUERCAS HEXAGONALES



	inches								
Rosca	1/4	5/16	3/8	7/16	1/2	9/16	5/8	3/4	7/8
e	0.505	0.577	0.650	0.794	0.866	1.010	1.083	1.300	1.515
s	0.437	0.500	0.562	0.687	0.750	0.875	0.937	1.125	1.312
m	0.224	0.271	0.333	0.380	0.442	0.489	0.552	0.651	0.760
m1	0.286	0.333	0.411	0.458	0.567	0.614	0.724	0.822	0.916
m2	0.161	0.192	0.224	0.255	0.317	0.349	0.380	0.432	0.494
Rosca	1	1 1/8	1 1/4	1 3/8	1 1/2	1 3/4	2		
e	1.732	1.948	2.165	2.382	2.598	3.031	3.461		
s	1.500	1.687	1.875	2.062	2.250	2.625	3.000		
m	0.874	0.989	1.087	1.197	1.311	1.530	1.754		
m1	1.015	1.176	1.275	1.400	1.530	-	-		
m2	0.562	0.629	0.744	0.806	0.874	0.999	1.129		

*Anexo 5.6 Tuercas hexagonales. Fuente: extraído el 10 de octubre del 2020,
https://www.gestiondecompras.com/files/products/mechanical_components_hardware/pernos_tornilleria_tuercas_arandelas_varilla_roscada_din_933_934_7989_125_127_4034_975_55_5_iso.pdf*

ACOPLAMIENTOS

ACOPLAMIENTOS DE LÁMINAS

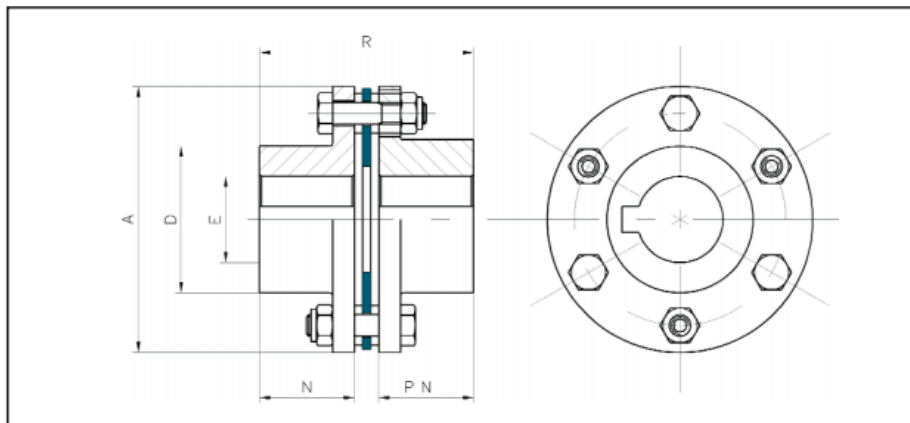
G2

ACOPLAMIENTOS DE LÁMINAS GTR/S






TABLA DE CARACTERÍSTICAS

Talla	Par (N · m)		Velocidad máxima (rpm)	Carga axial máx (Kg)	Desalineación	
	Nominal	Máximo			Angular °	Axial (mm)
*00	20	40	30.000	8	1°	1
*0	40	80	27.500	10	1°	1,4
1	100	200	25.000	14	0° 45'	0,8
2	150	300	22.000	19	0° 45'	0,95
3	300	600	20.000	26	0° 45'	1,25
4	700	1.400	16.000	34	0° 45'	1,45
5	1.100	2.200	14.000	53	0° 45'	1,65
6	1.700	3.400	12.000	70	0° 45'	2
7	2600	5200	10000	79	0° 45'	2,25
8	4000	8000	8000	104	0° 45'	2,45
9	7000	14000	7500	115	0° 45'	2,55
10	9000	18000	6000	138	0° 45'	2,65
11	12000	24000	5500	279	0° 45'	2,95
12	15000	30000	5500	358	0° 45'	3,05

TABLA DE MEDIDAS Y CÓDIGOS













Anexo 5.7 Catálogo de acoples de disco. Fuente: extraído el 20 de noviembre del 2020, <https://webcatalog.epidor.com/es/category/acoplamiento-de-disco-id-3032>

MARCAS DE GRADOS PARA PERNOS DE ACERO (EN PULGADAS)											
GRADOS Y MARCAS SODIPER	ESPECIFICACIÓN	MATERIAL	DIÁMETRO NOMINAL DEL PERNO	CARGA DE PRUEBA	RESISTENCIA MIN. A LA TRACCIÓN	CARGA DE PRUEBA	RESISTENCIA MIN. A LA TRACCIÓN	CARGA DE PRUEBA	RESISTENCIA MIN. A LA TRACCIÓN	DUREZAS	
				PSI	KG/mm ²	MPA	MIN	MÁX			
 GRADO 2	ASTM-A307 GRADO A	ACERO DE BAJO CARBONO	1/4" HASTA 3"		60.000		42		414	B69	B100
 GRADO 5	ASTM-A449 TIPO 1	ACERO DE MEDIO CARBONO TEMPLADO Y REVENIDO	1/4" HASTA 1" SOBRE 1" HASTA 1.1/2" SOBRE 1.1/2" HASTA 3"	85.000 74.000 55.000	120.000 105.000 90.000	60 52 63	84 74 63	586 510 379	827 724 620	C25 C19 HB183	C34 C30 HB235
 GRADO 8	ASTM-A354 GRADO BD	ACERO ALEADO TEMPLADO Y REVENIDO	1/4" HASTA 2.1/2"	120.000	150.000	84	105	827	1034	C33	C39
			SOBRE 2.1/2" HASTA 4"	105.000	140.000	74	98	724	965	C31	C39
 A 325	ASTM-A325 TIPO 1	ACERO DE MEDIO CARBONO TEMPLADO Y REVENIDO	1/2" HASTA 1"	85.000	120.000	60	84	586	827	C25	C34
			SOBRE 1" HASTA 1.1/2"	74.000	105.000	52	74	510	724	C19	C30
 A 490	ASTM-A490 TIPO 1	ACERO ALEADO TEMPLADO Y REVENIDO	1/2" HASTA 1.1/2"	120.000	150.000	84	105	827	1034	C33	C39

PSI : LIBRAS/PULGADAS CUADRADA
KG/mm² : KILOS POR MILIMETRO CUADRADO
MPA : 1 MILLÓN DE PASCALES

MARCAS DE GRADOS Y CLASES PARA TUERCAS DE ACERO (PULGADAS Y MÉTRICAS)

GRADOS Y MARCAS SODIPER	ESPECIFICACIÓN	DIÁMETRO NOMINAL DE LA TUERCA	CARGA DE PRUEBA	CLASES DE RESISTENCIA Y MARCAS SODIPER	ESPECIFICACIÓN	DIÁMETRO NOMINAL DE LA TUERCA	CARGA DE PRUEBA	
			PSI				N/mm ²	
 GRADO 2	ASTM-A563 GRADO A	1/4" HASTA 1.1/2"	90.000	 CLASE 5	ISO 898/2 CLASE 5	SOBRE M4 HASTA M7	580	
						SOBRE M7 HASTA M10	590	
						SOBRE M10 HASTA M16	610	
						SOBRE M16 HASTA M39	630	
 GRADO 5	ASTM-A563 GRADO B	1/4" HASTA 1" SOBRE 1" HASTA 1.1/2"	120.000 105.000	 CLASE 8	 CLASE 8	ISO 898/2 CLASE 8	SOBRE M4 HASTA M7	855
						SOBRE M7 HASTA M10	870	
						SOBRE M10 HASTA M16	880	
						SOBRE M16 HASTA M39	920	
 GRADO 8	ASTM-A563 GRADO DH	1/4" HASTA 1.1/2"	150.000	 CLASE 10	 CLASE 10	ISO 898/2 CLASE 10	SOBRE M4 HASTA M7	1040
						SOBRE M7 HASTA M10	1040	
						SOBRE M10 HASTA M16	1050	
						SOBRE M16 HASTA M39	1060	
 GRADO DH	ASTM-A563 GRADO DH (REFORZADA)	1/4" HASTA 4"	175.000					
 GRADO 2H	ASTM-A194 GRADO 2H (REFORZADA)	1/2" HASTA 1.1/2"	175.000					

PSI : LIBRAS/PULGADAS CUADRADA
N/mm² : NEWTON POR MILIMETRO CUADRADO

Anexo 5.8 Pernos y tuercas. Fuente: extraído el 20 de octubre del 2020,

<http://www.sodiper.cl/wp-content/themes/sodiper/catalogo.pdf>