

DISEÑO DE UN DISPOSITIVO DE LAMINACIÓN QUE REALICE
DEFORMACIÓN POR CIZALLAMIENTO EN LÁMINAS DE ALEACIONES DE
MAGNESIO AZ31 O AZ91

JIMMY TERUMI NEMOTO ABE

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERIAS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
INGENIERÍA MECÁNICA
MEDELLÍN
2014

DISEÑO DE UN DISPOSITIVO DE LAMINACIÓN QUE REALICE
DEFORMACIÓN POR CIZALLAMIENTO EN LÁMINAS DE ALEACIONES DE
MAGNESIO AZ31 O AZ91

JIMMY TERUMI NEMOTO ABE

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico

Director
EMIGDIO JOSÉ MENDOZA FANDIÑO
Magister en Física, Ingeniero Físico e Ingeniero de Materiales

Asesor
Daniel Peláez Cuellar
Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
MEDELLÍN
2014

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Medellín, 29 de agosto de 2014

CONTENIDO

GLOSARIO.....	15
RESUMEN	17
INTRODUCCIÓN	18
1. OBJETIVOS	21
1.1. Objetivo General	21
1.2. Objetivos Específicos.....	21
2. DISEÑO PRELIMINAR.....	22
2.1. MARCO TEÓRICO	22
2.1.1. Generalidades	22
2.1.2. Elementos aleantes más comunes.....	24
2.1.3. Estructura Cristalina del magnesio.....	26
2.1.4. Deformación en los sistemas HCP.....	27
2.2. PROPIEDADES MECÁNICAS.....	29
2.3. CONCEPTOS BÁSICOS	31
2.3.1. Estática	31
2.3.2. Dinámica	31
2.3.3. Materiales.....	31
2.3.3.1. Metales.....	31
2.3.3.2. Cerámicos.....	31
2.3.3.3. Polímeros.....	32

2.3.3.4. Materiales Compuestos	32
2.3.4. Termodinámica.....	32
2.3.5. Diseño	33
2.4. PLANTEAMIENTO INICIAL DE LA NECESIDAD.....	34
2.5. ESTADO DEL ARTE.....	35
2.5.1. <i>Equal channel angular extrusion (ECAE) o Equal channel angular pressing (ECAP)</i>	35
2.5.2. <i>High-pressure torsion (HPT)</i>	39
2.5.3. <i>Multi-directional forging (MDF)</i>	40
2.5.4. <i>Cyclic extrusion and compression (CEC)</i>	42
2.5.5. <i>Twist extrusion (TE)</i>	44
2.5.6. <i>Differential speed rolling (DSR)</i>	45
2.5.7. <i>Accumulative roll bonding (ARB)</i>	47
2.5.8. <i>ECAP-Conform</i>	49
2.5.9. <i>Repetitive corrugation and straightening (RCS)</i>	50
2.5.10. <i>Constrained Groove Pressing (CGP)</i>	51
2.5.11. <i>Conshearing Process</i>	54
2.5.12. <i>Continuous Confined Strip Shearing (C2S2)</i>	55
2.5.13. <i>Equal channel angular rolling (ECAR)</i>	58
2.5.14. <i>Half channel angular extrusion (HCAE)</i>	60
2.6. RECOLECCIÓN DE DATOS CUALITATIVOS Y CUANTITATIVOS USADOS COMO CRITERIO PARA EL DISEÑO.....	62

2.7. DEFINICION DE LA SOLUCIÓN AL PROBLEMA.....	64
3. DISEÑO BÁSICO.....	65
3.1. DEFINICIÓN DE SUBSISTEMAS.....	65
3.2. DIAGRAMA DE BLOQUES	66
3.3. CRITERIOS DE SELECCIÓN.....	67
3.3.1. Disponibilidad.....	67
3.3.2. Costo.....	67
3.3.3. Confiabilidad	67
3.3.4. Mantenimiento.....	68
3.3.5. Seguridad.....	68
3.4. PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN DE SUBSISTEMAS	68
3.4.1. Subsistema Bastidor	68
3.4.2. Subsistema Motores.....	69
3.4.3. Subsistema transmisión de potencia.....	70
3.4.4. Subsistema alimentación de material.....	72
3.4.5. Subsistema laminación y cizallamiento.	72
3.4.6. Desplazamiento vertical	75
3.4.7. Material rodillos	75
3.4.8. Subsistema de descarga de material	77
3.5. INTEGRACIÓN DE LOS SUBSISTEMAS	77
4. ANÁLISIS Y selección DE LOS ELEMENTOS DEL PROTOTIPO.....	80

4.1. Planos de ensamble	102
Conclusiones.....	102
Referencias	103
ANEXOS	106
Anexo 1. Catalogo motores SIEMENS	106
Anexo 2. Catalogo Motoreductores Nord.....	107
Anexo 3. Tabla ANSI para selección de la cadena.....	108
Anexo 4. Tabla para la Selección del Piñón	109
Anexo 5. Característica del sprocket comercial	110
Anexo 6. Catalogo Rosta para la selección de tensores	111
Anexo 7. Rodamientos para Temperaturas Extremas	112
Anexo 8. Diseño del prototipo.....	113
Anexo 9. Laminadora de cizallamiento según el criterio del fabricante	128

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. a) Comparación de resistencia a la tracción vs % de elongación entre el proceso de fundición y forja. b) Principales aleaciones (Friedrich & Mordike, 2006)	24
Figura 2. Arreglos cristalinos más comunes en materiales metálicos a) BCC, b) FCC y c) HCP (Groover, 2007)	26
Figura 3. Planos de deslizamiento y dirección de deslizamiento en HCP a) Plano basal (0001), b) direcciones en el plano basal (Friedrich & Mordike, 2006)	28
Figura 4. Macla. (Friedrich & Mordike, 2006)	28
Figura 5. Deslizamiento piramidal y prismático (Friedrich & Mordike, 2006)	29
Figura 6. a) Prueba deflexión en tres puntos; b) Prueba de flexión en cuatro puntos	29
Figura 7. Probetas para ensayos de tensión de acuerdo a la norma ASTM E85530	
Figura 8. Aplicaciones Durante la Segunda Guerra Mundial.....	34
Figura 9. Esquema del dispositivo ECAE. (Zehetbauer & Zhu, 2009).....	36
Figura 10. Cuatro rutas diferentes para el mismo proceso.....	36
Figura 11. Grafica de dureza vs. tamaño de grano. (Biswas, Dhinwal, & Suwas, 2010).....	38
Figura 12. Proceso <i>High-pressure torsion</i> . (Zehetbauer & Zhu, 2009).....	39
Figura 13. La dureza en función del radio a diferentes revoluciones. (Vorhauer & Pippan, 2004).....	40
Figura 14. Proceso de forja multidireccional. (Nakao & Miura, 2010).....	41

Figura 15. Muestra de ensayo a tracción con ángulo de inclinación de 0° ,45° y 90°. (Yang, Sun, Xing, Miura, & Sakai, 2008).....	41
Figura 16. Efectos de anisotropía en las curvas de esfuerzo-deformación en las aleaciones AZ31 a una temperatura de 423. (Yang, Sun, Xing, Miura, & Sakai, 2008)	42
Figura 17. Tamaño de grano en AZ31 en el proceso MDF a temperaturas constantes y decrecientes. (Yang, Sun, Xing, Miura, & Sakai, 2008)...	42
Figura 18. Proceso cíclico de extrusión y compresión.	43
Figura 19. Visto a través de la microscopía óptica a) Inicial b) 1 pasada por el CEC c) 3 pasadas por el CEC d) 7 pasadas por el CEC. (Chen, y otros, 2007)	43
Figura 20. Proceso de extrusión con retorcida.....	44
Figura 21. Esquema del dispositivo DSR. (Ji & Park, 2008).....	45
Figura 22. Microscopía óptica por el proceso DSR a) comercial b) después de 30% de reducción a 150°C c) después de 70% de reducción a 150°C d) después de 70% de reducción a 200°C. (Ji & Park, 2008).....	46
Figura 23. Proceso de unión por laminado acumulativa. (Zehetbauer & Zhu, 2009)	47
Figura 24. <i>Configuración ECAP-conform.</i> (Zehetbauer & Zhu, 2009)	49
Figura 25. Alambre de aluminio por el proceso ECAP-Conform. (Zehetbauer & Zhu, 2009).....	49
Figura 26. Equipo de corrugación y enderezamiento repetitivo. (Huang, Zhu, Alexander, Liao, Lowe, & Asaro, 2003)	50
Figura 27. a) microscopía óptica antes del proceso RCS. b) TEM después del proceso. c) Microscopía óptica después del proceso en el plano	

longitudinal (plano x). (Huang, Zhu, Alexander, Liao, Lowe, & Asaro, 2003)	51
Figura 28. Proceso CGP a) etapa de corrugación b) etapa de enderezamiento c) etapa de corrugación con rotación d) etapa de enderezamiento con rotación e) imagen real de la etapa de corrugación f) imagen real de la etapa de enderezamiento. (Khakbaz & Kazeminezhad, 2011)	52
Figura 29. Tamaño de grano vs repetición en el proceso CGP. (Khakbaz & Kazeminezhad, 2011)	53
Figura 30. Comportamiento a tracción a) recocido b) CGP (Khakbaz & Kazeminezhad, 2011)	53
Figura 31. Esquema donde se genera deformación por cizallamiento en CGP. (Yoon, Krishnaiah, Chakkingal, & Kim, 2008).	54
Figura 32. Esquema del dispositivo satellite-mill-rolling. (Zehetbauer & Zhu, 2009)	55
Figura 33. Esquema del dispositivo C2S2. (Chung, Han, Lee, & Seok, 2001)	56
Figura 34. a) Micrografía óptica b) análisis numérico. (Lee, Seok, & Suh, 2002)	56
Figura 35. a) Variación de la dureza de las láminas 1050 Al con respecto a número de pasadas. b) Variación de la dureza de laminado en frío de las láminas 1050 Al medido en función de la tasa de reducción (R). (Lee, Seok, & Suh, 2002)	57
Figura 36. a) Variación de la dureza como función de la deformación efectiva inducido por el DCAP y laminación en frío. b) Variación de la dureza como función de la deformación efectiva. (Lee, Seok, & Suh, 2002) ...	58
Figura 37. Esquema del dispositivo ECAR. (Chen, Cheng, & Xia, 2007).	59

Figura 38. Deformación por cizallamiento en las láminas de magnesio en ECAR.	59
Figura 39. Diagrama del proceso HCAE: a) Isométrico, b) superior, c) lateral (Kyungjin & Jonghun, 2013)	61
Figura 40. Microestructura en el proceso HCAE:a) inicial sin procesar, b) 523K y c) 573K (Kyungjin & Jonghun, 2013).....	62
Figura 41. Diseño Preliminar de la laminadora de cizallamiento.....	64
Figura 42. Diagrama de bloques	66
Figura 43. Mecanismo con rodillos de alimentación y extracción tipo ECAR.	73
Figura 44. Mecanismo con rodillos de alimentación y extracción tipo C2S2	73
Figura 45. Sistema de laminación doble con punzón.	74
Figura 46. Integración de los subsistemas	78
Figura 47. Proceso de cizallamiento, a) se calienta los elementos con una resistencia tubular, b) ingreso completo de la lámina, y c) se baja el punzón.	79
Figura 48. Propagación de potencia.....	82
Figura 49. Esquema del eje.....	89
Figura 50. Fuerzas que actúan en el eje	89
Figura 51. Diagrama de fuerzas, cortantes y momentos flectores en el plano YZ.	93
Figura 52. Diagrama de fuerzas y momentos flectores en el plano XY.....	94
Figura 53. Diagrama S-N.....	98
Figura 54. Diagrama de vida constante.....	99

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades físicas y atómicas del magnesio	22
Tabla 2. Tabla con las normativas ASTM para la designación de las aleaciones de magnesio.....	23
Tabla 3. Elementos aleantes más comunes (Friedrich & Mordike, 2006)	25
Tabla 4. Propiedades y uso de aleaciones más comunes. (Friedrich & Mordike, 2006)	26
Tabla 5. Dimensión de las probetas para ensayos de tensión requerida por la norma ASTM E855.....	30
Tabla 6. Resumen de las condiciones óptimas para la superelasticidad en las aleaciones de magnesio con ECAP. (Figueiredo, Terzi, & Langdon, 2010).....	37
Tabla 7. Variables de proceso para el ECAE. (Zehetbauer & Zhu, 2009)	38
Tabla 8. Resumen de propiedades mecánicas con el CEC. (Lin, Wang, Peng, & Roven, 2008).....	44
Tabla 9. Propiedad a tracción de Al puro antes y después del TE. (Orlov, Beygelzimer, Synkov, Varyukhin, Tsuji, & Horita, 2009)	45
Tabla 10. Comparación del AZ31 en el proceso ECAP y ARB. (Zhan, Li, & Chen, 2007)	48
Tabla 11. Propiedades mecánicas de AZ31 comercial y procesado por el ARB, σ_b = resistencia a la tracción, σ_y = limite elástico. (Zhan, Li, & Chen, 2007)	48
Tabla 12. Comparación del alambre de Al inicial con respecto al obtenido en el proceso. (Zehetbauer & Zhu, 2009).	50

Tabla 13. Comparación de cantidad de esfuerzo entre laminación y el DCAP. ...	58
Tabla 14. Dimensiones de la herramienta usado para la prueba de conformado. (Chen, Cheng, & Xia, 2007)	60
Tabla 15. Cuadro de selección para el bastidor	69
Tabla 16. Cuadro de selección para el sistema motriz	70
Tabla 17. Cuadro de selección de transmisión de potencia.	71
Tabla 18. Cuadro de selección para la alimentación de material.	72
Tabla 19. Cuadro de selección de laminación y cizallamiento.	74
Tabla 20. Cuadro de selección para desplazamiento vertical del rodillo.	75
Tabla 21. Cuadro de selección para el material de los rodillos.	76
Tabla 22. Cuadro de selección para el descarga del material.	77
Tabla 23. Tabla de eficiencias.	83
Tabla 24. Inercia Generalizada	85
Tabla 25. Torque de Arranque del sistema.	86
Tabla 26. Torque de arranque del motor seleccionado.	86
Tabla 27. Factor de seguridad.	87
Tabla 28. Factor de carga.	96
Tabla 29. Factor de tamaño.	96
Tabla 30. Factor de acabado superficial.	96
Tabla 31. Factor de temperatura.	97
Tabla 32. Factor de confiabilidad.	97
Tabla 33. Coeficiente de concentrador de esfuerzo.	98

Tabla 34. Factores de seguridad bajo fatiga.	99
Tabla 35. Factor de Temperatura.....	100
Tabla 36. Cuñas rectangulares.	101

GLOSARIO

ALEACIÓN: Material homogéneo con propiedades metálicas que está compuesto de dos o más elementos donde al menos uno de ellos debe ser un metal.

ALEACIÓN LIGERA: Tipo de aleación en el que el elemento principal de la aleación, debe contener aluminio, magnesio u otro metal de baja densidad.

CIZALLADURA: Deformación en la que sólo intervienen fuerzas tangenciales.

CONFORMACIÓN: Son procesos de manufactura en los cuales se usa la deformación plástica para cambiar la forma de las piezas.

DÚCTIL: Es una propiedad del material que indica la cantidad de deformación que puede soportar antes de que ocurra una falla. (Mikell, 2007)

EXTRUSIÓN: Es un proceso de formado por compresión en el cual el metal de trabajo es forzado a fluir a través de la abertura de un troquel para darle forma a su sección transversal. (Mikell, 2007)

LAMINACIÓN: Es un proceso de deformación en el cual el espesor del material de trabajo se reduce mediante fuerzas de compresión ejercidas por dos rodillos opuestos. (Mikell, 2007)

LAMINACIÓN POR CIZALLADURA: A diferencia de la laminación, este proceso no realiza una reducción en el espesor en la lámina, hay una alimentación debido a los rodillos y también contiene una etapa donde se realiza una deformación por cizalladura.

RECOCIDO: Consiste en calentar el metal a una temperatura adecuada, en la cual se mantiene por un cierto tiempo (llamado recalentamiento) y después se enfría lentamente. (Mikell, 2007)

RECRISTALIZACIÓN: Es un proceso donde se forman granos nuevos libres de deformación debido a un aumento de temperatura y el metal se comporta como un material plástico. (Groover, 2007)

TEMPERATURA DE RECRISTALIZACIÓN: Es una medida en escala absoluta y es la temperatura donde ocurre el fenómeno de la recristalización, la temperatura esta alrededor de la mitad del punto de fusión ($0.5T_m$). (Groover, 2007)

RELACION DE HALL-PETCH: Según esta relación, se dice que la resistencia y dureza de los materiales generalmente aumenta con la disminución de las dimensiones de los granos cristalinos. (Zehetbauer & Zhu, 2009)

VALOR DE LANKFORD: Es un parámetro que refleja la tendencia del material a conformarse. (Zehetbauer & Zhu, 2009)

RESUMEN

En la última década, se han estado desarrollando métodos que generan deformación plástica severa en las láminas metálicas con el fin de obtener una microestructura de grano fino o ultra fino. Estos materiales con estructuras submicrométrica, han tenido un gran impacto dado sus propiedades mecánicas elevadas y estos tendrían un potencial impacto en todos los campos de la ingeniería.

El objetivo de este proyecto consiste en desarrollar el diseño básico de un dispositivo de laminación que genere deformación por cizallamiento en láminas de aleaciones de magnesio para mejorar la conformabilidad a temperatura ambiente y elaborar los planos del diseño básico para apoyar la fabricación del prototipo. Para el diseño del mecanismo de deformación plástica severa, el proceso consiste en varias etapas: el diseño preliminar consiste en recopilar información bibliográfica para establecer las parámetros necesarias para elegir la más apropiada según la necesidad. La segunda etapa es el diseño básico, donde la máquina se divide en subsistemas para seleccionar la mejor alternativa para cada uno e integrando cada uno de ellos nuevamente en un conjunto. La última etapa se concluye al desarrollar los planos de ensamble del diseño básico del mecanismo. En el presente trabajo se reporta el diseño de un mecanismo de deformación plástica severa, con base en los mecanismos actualmente desarrollados, para poder realizar el proceso de deformación plástica severa en la Universidad Pontificia Bolivariana.

Se presenta un diseño similar al *Equal channel angular rolling* (ECAR) con algunas modificaciones. Estas modificaciones fueron implementadas para garantizar el funcionamiento de la máquina y también para poder modificar una gran cantidad de parámetros que contribuirían en la obtención de ensayos variados para definir una configuración deseable para las láminas.

PALABRAS CLAVES: ALEACIÓN, CONFORMABILIDAD, DEFORMACIÓN POR CIZALLAMIENTO, MAGNESIO

INTRODUCCIÓN

En la industria, siempre hay una constante búsqueda de nuevos materiales que tengan características y propiedades únicas. Una de las propiedades que atraen a los ingenieros es el peso y la reducción de tamaño, lo cual están ligados de cierta manera. En la industria de transporte, ya sea por tierra o aire, la reducción del peso implica una reducción en el consumo energético y consecuentemente en la reducción del dióxido de carbono arrojado al medio ambiente. En la industria electrónica, los materiales livianos contribuyen en la satisfacción del cliente ya que los equipos como; computadores portátiles, cámaras, celulares, etc. son más atractivos cuando son más pequeños y livianos.

Las aleaciones de magnesio, por su alta resistencia específica, se han convertido en una alternativa importante para la sustitución de piezas fabricadas en otro tipo de aleaciones tradicionales, tales como aleaciones de cobre, aluminio y aceros. Las aleaciones de magnesio son consideradas los materiales del futuro y se podrían implementar en los campos más exigentes de la ingeniería, como son la industria aeroespacial, automotriz y en la electrónica, sin embargo, su poca conformabilidad y su limitada ductilidad a temperatura ambiente limitan el desarrollo en los diferentes tipos de aplicación. Nuevos estudios indican que con procesos adicionales implementados en los procesos de forja, es posible modificar las características de las láminas de aleaciones de magnesio. Para que se masifique el uso de estas aleaciones se deben implementar desarrollos que se adapten en los procesos industriales actuales para reducir los costos y aumentar la demanda en la industria de estas aleaciones (Friedrich & Mordike, 2006).

A los principios de los 90's, la asociación de fabricantes europeos de automóviles, ACEA, por sus siglas en francés, se comprometió a reducir el CO_2 a un 25% para el 2008. Este acuerdo influenció dramáticamente en la reducción del consumo energético, para así disminuir la emisión del CO_2 . Para lograr estos deseos, se desarrollaron nuevas áreas de investigación en la tecnología de materiales. En investigaciones realizadas, se concluyó que una reducción de masa de un 10%, lograría disminuir el consumo de combustible en 5% aproximadamente. Por esta razón emplear magnesio se convirtió en una posible solución, pero teniendo en cuenta que las normas de seguridad se deben priorizar en las cargas de operación. Existen 4 módulos principales en los vehículos automotores donde se podrían implementar los componentes de magnesio, estos son; transmisión, interior, cuerpo y el chasis. (Friedrich & Mordike, 2006)

En el campo de la electrónica y la telecomunicación, los dispositivos pequeños y ligeros son deseables: Adicionalmente hay otras razones para la implementación del magnesio tales como; ergonomía, protección contra la frecuencia electromagnética, reducción de sonido y vibración, capacidad para reducir el calor interno generado en los componentes electrónicos, etc. (Friedrich & Mordike, 2006).

Una de las industrias que más ha apoyado al estudio e investigación de las aleaciones de magnesio ha sido la industria automotriz. Sin embargo, las aleaciones de magnesio tienen baja conformabilidad a temperatura ambiente (Chen, Cheng, & Xia, 2007), debido a su estructura HCP (empaquetamiento hexagonal compacto), lo cual limita la cantidad de deformación plástica que se les puede aplicar. En estudios recientes se ha encontrado que se puede mejorar la ductilidad de estas aleaciones por medio de la adición de elementos de aleación, tales como aluminio y litio, y mediante procesos termo-mecánicos que permiten refinar los granos mediante la aplicación de esfuerzos de cizallamiento durante los procesos de conformación plástica. (Friedrich & Mordike, 2006)

Para obtener propiedades elevadas de un material, esto requiere de una implementación de procesos adicionales como laminación y tratamientos térmicos. Como se requieren de procesos adicionales, el costo de fabricación aumenta siendo una desventaja en el mercado. Durante los últimos años, se han venido desarrollando máquinas para obtener láminas con propiedades elevadas evitando procesos adicionales. Una de las soluciones es la implementación de una máquina que realiza deformación por cizallamiento para obtener láminas con unas propiedades elevadas como resistencia a la tracción y conformabilidad por medio de una refinación de la microestructura. (Lee, Seok, & Suh, 2002).

Uno de los procesos ampliamente estudiado para la aplicación de deformaciones sucesivas sin afectación dimensional es el *Equal Channel Angular Pressing* (ECAP). Este proceso genera deformación por cizallamiento dentro del material para obtener granos más finos sin la afectación del área transversal de la muestra. Esta técnica sentó las bases para el desarrollo de técnicas de refinamiento de granos para obtener láminas con propiedades elevadas. Los procesos que surgieron con las bases del ECAP fueron; *Continuous Confined Strip Shearing* (C2S2), el *Differential Speed Rolling* (DSR), el *Accumulative Roll Bonding* (ARB), entre otros. (Azushima, y otros, 2008).

En este proyecto se realiza el diseño de un dispositivo de laminación, que permite aplicar deformación por cizallamiento en láminas de aleaciones de magnesio, para implementarlo posteriormente de los procesos de recocido con el fin de controlar las propiedades microestructurales para mejorar la resistencia mecánica y la ductilidad de dichas láminas. Para lograr este objetivo, es necesario conocer las propiedades del magnesio, sus aleaciones más importantes y los antecedentes de los mecanismos de laminación utilizados o los que se encuentran en etapas de desarrollo, para plantear un diseño versátil y factible de un equipo laminador a escala piloto.

De los tipos de dispositivos para laminación de magnesio existentes que realizan deformación por cizallamiento, uno de los mecanismos más eficientes es el *Continuous Confined Strip Shearing* (C2S2) por su simplicidad. Las ventajas que tiene este dispositivo es la capacidad de trabajar láminas de forma continua, la recuperación del área transversal después de la etapa de laminación y su diseño

simple. Este proceso se podría integrar en los procesos actuales de laminación ya que no tendría que detener el flujo de las láminas

Este trabajo tiene un gran futuro debido a que las aleaciones de magnesio abren nuevos campos de aplicaciones en muchos sectores industriales. Estas aleaciones tienen ventajas como; el magnesio se encuentra en un alto porcentaje sobre la corteza terrestre, su reciclaje es fácil y económico, se considera un material ultraliviano, su resistencia específica es alta y tiene buena capacidad de amortiguación al impacto o sonido. Comparado con los plásticos, la ventaja que tienen estas aleaciones son; mayor estabilidad térmica, capacidad de absorción de los rayos x, y la capacidad de protección ante las interferencias electromagnéticas. (Friedrich & Mordike, 2006)

Aunque las aplicaciones de las aleaciones de magnesio sean extensas, su poco conocimiento y la falta de investigación e implementación en aplicaciones de alta demanda en nuestro entorno, las han marginado del mercado. Para que estos materiales sean comercialmente rentables, se debe aumentar la demanda en los campos más exigentes de la ingeniería, integrando las aleaciones con los procesos de laminación actualmente implementados en la industria nacional para minimizar los cambios en los procesos de producción de lámina y que su producción sea de forma económica y continua. Para poder alcanzar el objetivo, se desea diseñar un prototipo de la laminadora a escala piloto para una posible implementación en los procesos industriales.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo General

Desarrollar el diseño de un prototipo que permita manufacturar láminas de aleaciones de magnesio aplicando deformación por cizallamiento, específicamente para aleaciones de magnesio AZ91 y AZ31.

1.2. Objetivos Específicos

Investigar los distintos dispositivos y métodos usados en la aplicación de deformación por cizallamiento sobre láminas de aleaciones de magnesio.

Desarrollar el diseño básico de un mecanismo laminador que realice la deformación por cizalladura adecuada en láminas de aleaciones de magnesio.

Elaboración de los planos de las piezas del diseño básico del prototipo para apoyar el proceso de fabricación.

2. DISEÑO PRELIMINAR

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. Generalidades

El magnesio, como elemento, fue descubierto por Sir Humphrey Davy en 1808, pero los investigadores tardaron casi 100 años para poder emplear este material en aplicaciones estructurales. El magnesio es actualmente el metal con aplicaciones estructurales más ligero y es uno de los elementos más abundantes, ocupando el octavo lugar de minerales más abundantes en la corteza terrestre con un 2.2% y en el agua del mar con una abundancia del 0.13%, donde este último se encuentra en forma de cloruros y es la fuente principal de magnesio para la producción de magnesio metálico con fines comerciales (Bádenas, Planella, Rius, Doménech, Salvadó, & Estany, 2001).

El magnesio pertenece al grupo de los metales alcalinotérreos. Se encuentra en el grupo 2 de la tabla periódica. Se clasifica como un metal ligero, siendo 4 veces menos denso que el acero e incluso la mitad del aluminio. Este elemento tiene la ventaja de tener una alta resistencia específica siendo solo superado por el berilio. (Bádenas, Planella, Rius, Doménech, Salvadó, & Estany, 2001). En la tabla 1 se encuentran algunas propiedades físicas y atómicas de interés.

Tabla 1. Propiedades físicas y atómicas del magnesio

Numero atómico	12
Peso atómico	24.305 uma
Diámetro atómico	0.32 nm
Densidad	1738 kg/m ³
Volumen atómico	14 cm ³ /mol
Estructura cristalina	Hexagonal compacta (25°C)
Parámetros de red	a=3.21 Å; c=5.21 Å (25°C)
Relación de parámetros de red	c/a=1.624

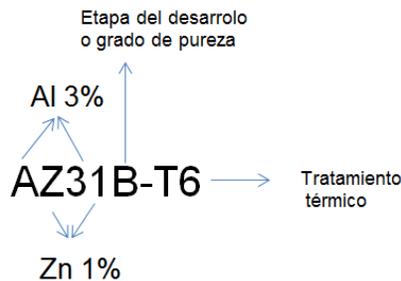
El magnesio puro es relativamente blando y carece de resistencia, razón por la cual debe ser aleado con otros metales para aumentar su resistencia a fin de poder emplearlo en aplicaciones estructurales. Existen alrededor de 25 elementos que se pueden alea con el magnesio pero solo alrededor de 10 de ellos pueden considerarse como elementos de aleación, ya que son elementos que al ser

agregados mejoran las propiedades mecánicas. La norma ASTM (American Society for Testing Materials), propone una nomenclatura para las aleaciones de magnesio, en la tabla 2 se puede observar el resumen de dicha norma.

Tabla 2. Tabla con las normativas ASTM para la designación de las aleaciones de magnesio.

PRIMERA PARTE	SEGUNDA PARTE	TERCERA PARTE	CUARTA PARTE
Indica los 2 principales elementos de aleación.	Indica los porcentajes redondeados de los 2 principales elementos de la aleación.	Distingue entre las aleaciones de diferentes con iguales porcentajes.	Indica las condiciones de fabricación, este consiste de una letra seguida de 1 o 2 números.

Ejemplo: para las aleaciones AZ31B-T6,



Comercialmente hay cinco grupos básicos disponibles. Estos elementos son el manganeso, aluminio, zinc, zirconio y tierras raras. Estas últimas se utilizan solo cuando se requieren mejores propiedades a elevadas temperaturas. (Friedrich & Mordike, 2006)

Para obtener las piezas de aleación de magnesio, se pueden distinguir dos procesos particulares; la primera es el proceso de fundición, tales como; fundición en arena, fundición en molde a presión, *squeeze casting*, *thixocasting*, *rheocasting*, entre otras. El segundo proceso es por forja, son aquellas piezas que se obtienen por; extrusión, laminado, conformado, entre otras. El primer proceso domina el mercado debido a que el magnesio tiene buenas propiedades de fundición pero su deformación a temperatura ambiente es limitada. A diferencia de las piezas por fundición, las piezas obtenidas por forjado tienen algunas ventajas respecto a las fundidas como: mejor ductilidad, dureza, resistencia a la fatiga, resistencia al impacto, entre otras, las cuales se obtienen mediante el control y la modificación de la microestructura, por esta razón, muchos estudios buscan el desarrollo de láminas de magnesio controlando uno o algunos de los parámetros antes enunciados. (Friedrich & Mordike, 2006)

Como se puede observar en la figura 1a., las piezas de aleación de magnesio obtenidas por el proceso de forja tienen propiedades mecánicas más elevadas comparadas con las piezas obtenidas por los procesos de fundición. El problema con las piezas de magnesio obtenidos por forja es que durante la conformación plástica a temperatura ambiente, la deformación ocurre por la activación del deslizamiento en el plano basal (0001) y en los planos de maclado, lo cual limita la ductilidad de las piezas fabricadas. (Friedrich & Mordike, 2006). Cabe anotar que las aleaciones de magnesio pueden conformarse por procesos convencionales como extrusión, laminación y forjado a temperaturas elevadas, pero la desventaja es la reducción de la resistencia de la lámina debido a la recristalización durante el proceso de conformado. (Friedrich & Mordike, 2006)

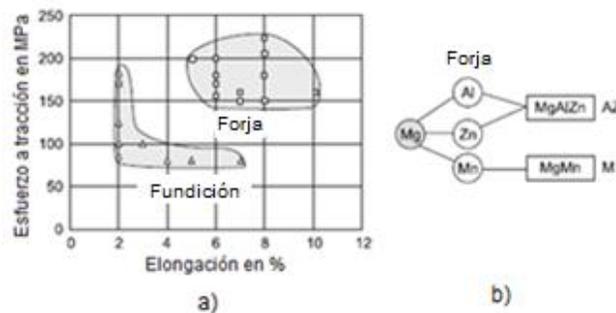


Figura 1. a) Comparación de resistencia a la tracción vs % de elongación entre el proceso de fundición y forja. b) Principales aleaciones (Friedrich & Mordike, 2006)

En el proceso de forja, los principales elementos de adición para las aleaciones de magnesio son el aluminio, zinc y manganeso, donde estos elementos mejoran la resistencia tanto a temperatura ambiente como a temperaturas elevadas. Ver figura 1b

2.1.2. Elementos aleantes más comunes

Las propiedades de las aleaciones de magnesio difieren mucho dependiendo de los elementos que se le adicionen a ellas. No todos los elementos se pueden considerar como aleantes ya que no mejoran las propiedades del material. Todos los elementos se adicionan en una cantidad limitada para obtener las propiedades deseadas. En la tabla 3 se muestran algunos de los elementos aleantes más comunes.

Tabla 3. Elementos aleantes más comunes (Friedrich & Mordike, 2006)

1. Elemento aleante	2. Propiedades	3. Observaciones
Aluminio	Aumenta resistencia y elasticidad.	Elemento ideal para ser aleado con el magnesio, se recomienda una cantidad entre 9-10%, diferente a esta cantidad genera dificultades debido a procesos adicionales.
Manganeso (Grupo M)	Aumenta la resistencia si contenido es mayor del 1.5%, pero el máximo contenido es de 2.5%. Buena conformabilidad, buena resistencia contra la corrosión.	Es adecuado para los procesos de extrusión y es fácil de soldar. Por sus propiedades se utilizan mucho para revestimientos y en los ánodos.
Aluminio y Zinc (Grupo AZ)	Zinc aumenta la resistencia si contenido es mayor del 3%.	Resistencias muy elevadas debido a que los elementos aleantes fortalecen esta propiedad.
Zinc y Zirconio (Grupo ZK)	Aumenta la conformabilidad.	Estas aleaciones tienen mediana y alta resistencia. Se utilizan para procesos de extrusión y forja.
Zinc y tierras raras (Grupo ZE)	Refina los granos y consecuentemente mejora la resistencia a la tracción.	Estas aleaciones son adecuadas para la producción de placas y láminas. Tiene una resistencia media y alta ductilidad.
Itrio y tierras raras (WE)	Alta resistencia en temperaturas elevadas	Estas aleaciones son adecuadas para procesos de extrusión y forja.
Torio, Zirconio o Manganeso	Fortalece la solución sólida.	Adecuado para la producción de placas y láminas.
Litio (Grupo LA)	Reduce la densidad de la aleación. El litio da una buena conformabilidad debido a que activa planos de deslizamiento adicional.	Se utilizan principalmente para procesos de forja, sin embargo la resistencia es relativamente baja.

La tabla 4 muestra las aleaciones más comunes obtenidas principalmente por forja. Se puede observar también algunas propiedades de interés como la resistencia a la tracción y la elongación de las láminas. El grupo de aleaciones AZ tienen propiedades apropiadas para aplicaciones de ingeniería.

Tabla 4. Propiedades y uso de aleaciones más comunes. (Friedrich & Mordike, 2006)

1.	2. Aleación	3. Propiedades Mecánicas		4. Uso
		Resistencia a la tracción [Mpa]	Elongación [%]	
M	M2	215	4	Para extrusión con presiones altas. Valores de esfuerzo medio, soldable y resistencia a la corrosión.
AZ	AZ31	240	10	Para extrusión y forja. Valores de esfuerzo alto y medio, resistencia a la corrosión.
	AZ61	270	9	
	AZ80	300	8	
ZK	ZK30	300	9	Para extrusión y forja. Valores de esfuerzo alto y medio con buena deformabilidad.
	ZK60	315	8	
WE	WE43	260	6	Para extrusión y forja. Esfuerzo alto a temperaturas elevadas.
	WE54	280	6	

2.1.3. Estructura Cristalina del magnesio

Las propiedades de cada material metálico están estrechamente ligadas a su estructura cristalina. En los metales, existen principalmente tres tipos de estructuras cristalinas; a) cubica centrada en el cuerpo (BCC), b) cubica centrada en las caras (FCC) y c) hexagonal de empaquetamiento compacto (HCP). En la figura 2 se puede observar los tres tipos de estructuras cristalinas. Hay algunos metales (u otro material) que a temperaturas diferentes, puede cambiar el tipo de estructura cristalina, este tipo de transformaciones son conocidas como transformaciones alotropicas (Groover, 2007).

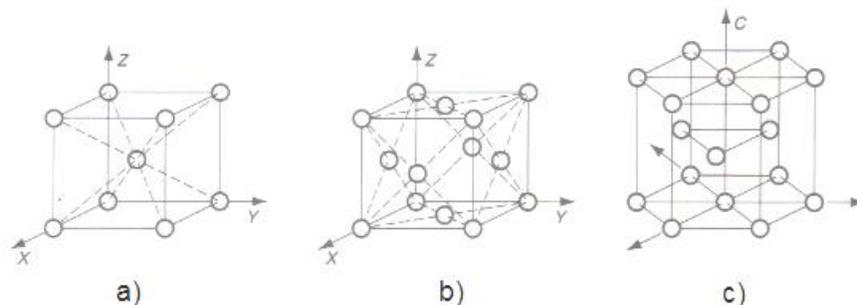


Figura 2. Arreglos cristalinos más comunes en materiales metálicos a) BCC, b) FCC y c) HCP (Groover, 2007)

Para entender las características cristalinas del magnesio y sus aleaciones, es importante identificar los planos de los cristales. Para las estructuras simples como el BCC y FCC se utilizan los índices de Miller, que es un sistema coordinado en tres dimensiones, para determinar la ubicación de puntos, direcciones y planos en redes cristalinas. Para los sistemas HCP, se desarrollaron índice de Miller-Bravais. El método de índice de Miller-Bravais contiene 4 coordenadas (h,k,i y l), los parámetros h,k y l se obtienen de la misma manera que en el método de los índices de Miller, mientras que el parámetro i se obtiene al cumplir la condición de; $i = -(h + k)$ (Askeland & Phulé, 2004)

2.1.4. Deformación en los sistemas HCP

Para comprender el comportamiento mecánico de las aleaciones de magnesio, se deben entender los mecanismos que determinan la deformación en materiales policristalinos. Según Von Mises, para que exista una deformación uniforme sin generar fractura en los límites de granos, deben existir al menos 5 sistemas de deslizamiento independiente en los policristales. El magnesio, a temperatura ambiente, solo dispone de tres sistemas de deslizamiento y no tiene a su disposición 5 sistemas de deslizamiento independiente. Para generar estas deformaciones se requieren de otros sistemas de deslizamiento, aparte del basal (Friedrich & Mordike, 2006).

El comportamiento de la deformación de los policristales de magnesio es determinado por la activación de los sistemas no basales. Aparte de los deslizamientos basales, los deslizamientos que juegan un papel importante en el comportamiento a la deformación en las aleaciones de magnesio es el deslizamiento prismático de primer orden y el deslizamiento piramidal de segundo orden. Para mejorar la plasticidad del magnesio, es necesario incrementar las actividades de sistemas no basales. (Friedrich & Mordike, 2006).

Las aleaciones de magnesio tienen una baja conformabilidad a temperatura ambiente debido a su estructura cristalina. A pesar de esto, puede ser deformada en procesos clásicos como la extrusión, laminado y forjado a temperaturas por encima de 200 a 225°C dependiendo de la composición de la aleación. Por debajo de los 225°C, para los magnesios puros, los deslizamientos solo ocurren en los planos basales (0001). Los planos de deslizamiento son definidos por las direcciones a lo largo de los planos y direcciones de átomos que estén empaquetados de manera más compacta, ver figura 3.

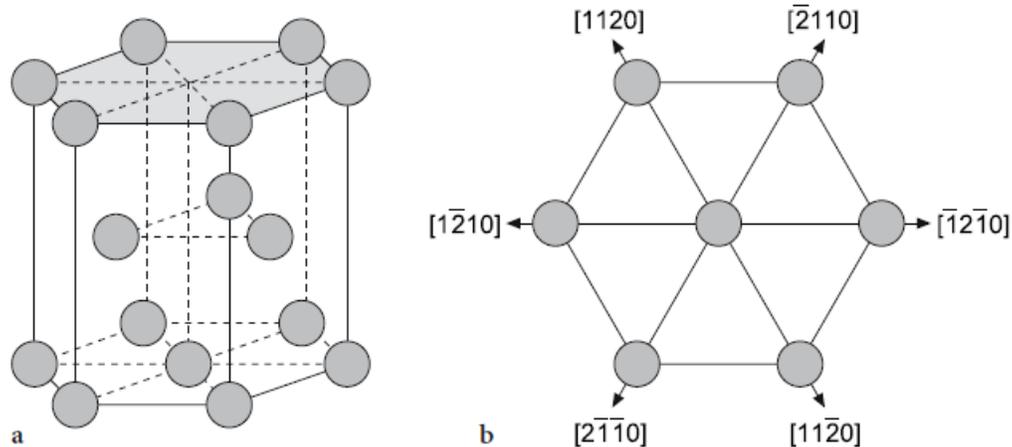


Figura 3. Planos de deslizamiento y dirección de deslizamiento en HCP a) Plano basal (0001), b) direcciones en el plano basal (Friedrich & Mordike, 2006)

Aparte del deslizamiento basal, existe otro mecanismo de deformación a temperatura ambiente conocido como macla, ver figura 4 (Friedrich & Mordike, 2006).

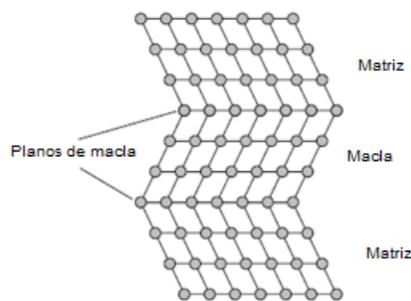


Figura 4. Macla. (Friedrich & Mordike, 2006)

A temperaturas por encima de los 225°C se activan los planos de deslizamiento piramidal. Estos son activados debido a la alta movilidad de los átomos a estas temperaturas. Estos deslizamientos mejoran la ductilidad de la pieza, ver figura 5.

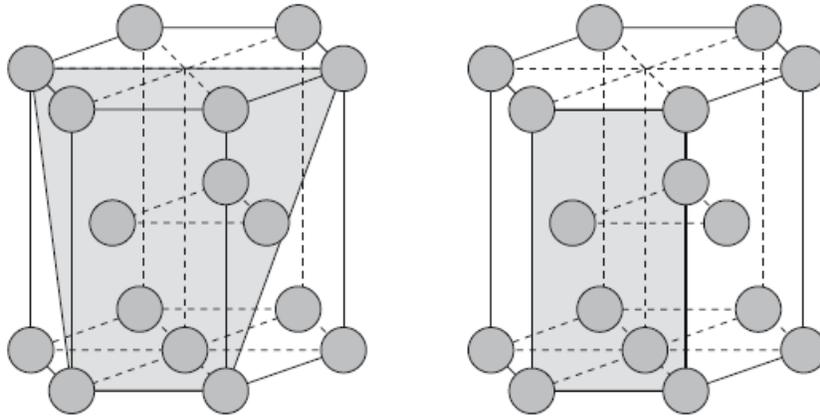


Figura 5. Deslizamiento piramidal y prismático (Friedrich & Mordike, 2006)

2.2. PROPIEDADES MECÁNICAS

Todos los materiales deben de aprobar unos controles de calidad para garantizar su servicio. En esta sección se presentan algunas normas como el ASTM B90/B90M que es la especificación estándar para las placas y láminas de las aleaciones de magnesio, el ASTM B557 es el método de prueba estándar para pruebas de tensión, el ASTM E855 es el método de prueba estándar para pruebas de flexión y el ASTM E2218 es el método de prueba estándar para determinar curvas de límite de conformación. De acuerdo a la norma ASTM B90/B90M, las platinas son aquellas que se obtienen por laminado con una sección transversal rectangular con un espesor superior o igual a 0.250 in. [6.3mm]. Las láminas son aquellas que tienen una sección transversal rectangular con espesores entre 0.006 y 0.249 in. [entre 0.15 6.3 mm].

En la norma ASTM E855 para pruebas de tensión, se describen los métodos para determinar el módulo de elasticidad mediante flexión. Para los ensayos de flexión (bend testing) se deben usar muestras rectangulares. Se deben identificar la orientación relativa de la muestra con respecto a la orientación de la dirección de rolado. Las maquinas utilizadas para estos métodos se le denominan prueba de doblado o prueba de flexión, en la figura 6, se puede observar una simplificación de la forma de aplicación de fuerzas para los ensayos de flexión.

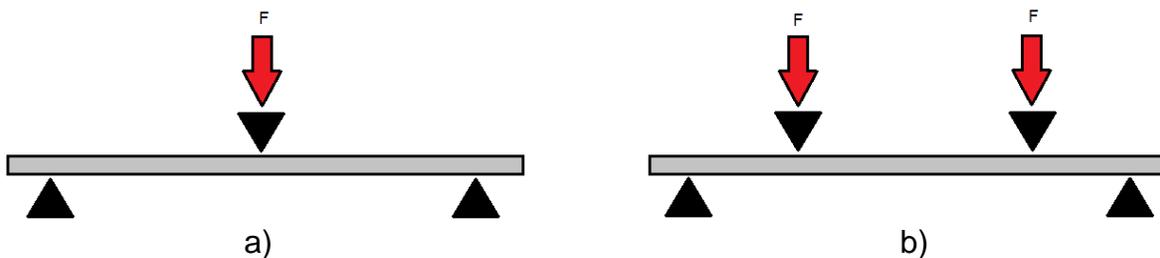


Figura 6. a) Prueba deflexión en tres puntos; b) Prueba de flexión en cuatro puntos

Esta norma recomienda que el espesor mínimo de las muestras sea de 0.010 in. (0.25 mm). El espesor debe medirse en los 4 extremos y en el centro, en caso de que haya variaciones superiores del 2 %, la muestra no es aceptable. El ancho debe ser medido en los dos extremos y en el centro de la muestra, si tiene variaciones superiores del 0.2 %, la muestra no es aceptable. Se deben ensayar 6 muestras, la mitad de las muestras deben ser probadas con la superficie cóncava mirando hacia arriba y la otra mitad mirando hacia abajo.

De acuerdo con la norma ASTM E855, la longitud entre soportes de la muestra debe ser 150 veces del espesor nominal si ésta se encuentra en un rango entre 0.010 hasta 0.020 in. (0.25 hasta 0.51 mm), si el espesor excede el valor 0.02 in (0.51 mm), sería 100 veces el espesor nominal. El ancho de la muestra debe ser de 0.15 in. (3.81 mm) si el rango del espesor es entre los 0.010-0.020 in. (0.25-0.51 mm), si excede los 0.020 in. (0.51 mm) el ancho debe ser de 0.5 in. (12.7 mm). La longitud total de la muestra debe ser 250 veces el ancho nominal si está entre un rango del 0.010-0.020 in., si excede los 0.02 in. Debe ser 165 veces el ancho nominal.

En el ASTM B557M se encuentran reportados los métodos para realizar pruebas de tensión para aleaciones de aluminio y magnesio. En la figura 7 se puede observar esquemáticamente las probetas para las pruebas de tensión y en la tabla 5 las dimensiones recomendadas de las probetas.

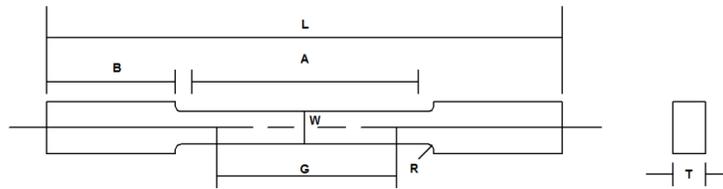


Figura 7. Probetas para ensayos de tensión de acuerdo a la norma ASTM E855

Tabla 5. Dimensión de las probetas para ensayos de tensión requerida por la norma ASTM E855

	Dimensiones en mm	
	Muestra estándar, lámina de 12.5 mm de ancho	Muestra reducida, lámina de 6 mm de ancho
G-Longitud de calibre	50±0.1	25.0±0.1
W-Ancho	12.5±0.2	6.0±0.1
T-Espesor	Espesor del material	Espesor del material
R-Radios de filete	12.5	6
L-Longitud total	200	100
A-Longitud de la sección reducida	57	32
B-Longitud de la sección de agarre	50	30
C-Ancho de la sección de agarre	20	10

2.3. CONCEPTOS BÁSICOS

En esta sección se reunirán todas las actividades científicas requeridas para obtener el diseño adecuado para la realización del cizallamiento en las aleaciones de magnesio. Todas estas actividades se deben tener en cuenta durante todo el proceso de diseño ya que son fundamentales para obtener resultados beneficiosos del dispositivo.

2.3.1. Estática

La estática analiza las cargas y estudia el equilibrio de fuerzas en los sistemas físicos en equilibrio estático. Es decir que la estática se utiliza principalmente para el análisis de las estructuras. Con la aplicación de la estática se pretende obtener los esfuerzos cortantes, fuerza normal, de torsión y de momento flector de un elemento para poder seleccionar el material que más se adecue para dicha estructura con el fin de asegurar su funcionamiento.

2.3.2. Dinámica

La dinámica estudia el movimiento de los cuerpos bajo la acción de cargas, es esencial en los sistemas mecánicos. Para el dispositivo es importante hallar la carga necesaria que se requiere en los rodillos para que pueda atravesar por el canal del dispositivo encargado de generar la deformación por cizallamiento en las láminas.

2.3.3. Materiales

Los materiales para ingeniería se clasifican en tres categorías básicas; metales, cerámicos y polímeros. Sus características químicas, mecánicas y físicas son diferentes. Existe una cuarta categoría, los compuestos, que son las mezclas de las categorías básicas. (Groover, 2007)

2.3.3.1. Metales

Son considerados los materiales más importantes de la ingeniería. Los metales se caracterizan generalmente por tener propiedades de ductilidad, maleabilidad, lustre y conductividad eléctrica y térmica elevadas (Groover, 2007).

2.3.3.2. Cerámicos

La importancia de estos materiales es debido a su abundancia en la naturaleza y sus propiedades mecánicas y físicas. Un material cerámico es un compuesto inorgánico que consiste en un metal (o semimetal) y uno o más no metales. Las propiedades que los hace útiles a estos materiales son la alta dureza,

características buenas de aislamiento térmico y eléctrico, estabilidad química y temperaturas de fusión elevadas. Las desventajas que poseen los cerámicos son su fragilidad y su escasa ductilidad (Groover, 2007).

2.3.3.3. Polímeros

Un polímero es un compuesto que consiste en moléculas de cadena larga, cada una de las cuales está hecha de unidades que se repiten y conectan entre sí. La mayoría de los polímeros se basan en el carbono, y por ello se les considera productos químicos orgánicos. Los polímeros se pueden dividir en tres categorías; termoplásticos, termofijos y los elastómeros (Groover, 2007).

Los polímeros termoplásticos son materiales sólidos a temperatura ambiente, pero si se les calienta a temperaturas de apenas unos cuantos cientos de grados, se vuelven líquidos viscosos. Esta característica permite que adopten formas de productos de modo fácil y económico. Se puede sujetar repetidas veces al ciclo de calentamiento y enfriamiento sin que el polímero se degrade en forma significativa (Groover, 2007).

Los termofijos no toleran ciclos repetidos de calentamiento. Cuando se calientan de inicio, se suavizan y fluyen de modo que se pueden moldear, pero las temperaturas elevadas también producen una reacción química que endurece el material y los convierte en un sólido que no se puede fundir. Si se le vuelve a calentar, los polímeros termofijos o termoestables se degradan y carbonizan, en vez de suavizarse (Groover, 2007).

Los elastómeros o cauchos, son polímeros que presentan alargamiento elástico extremo si se les sujeta a un esfuerzo mecánico relativamente débil (Groover, 2007).

2.3.3.4. Materiales Compuestos

Un material compuesto es un sistema de materiales compuesto por dos o más fases distintas físicamente cuya combinación produce propiedades agregadas diferentes (generalmente son mejores) de las de sus componentes de manera individual (Groover, 2007).

2.3.4. Termodinámica

La termodinámica se puede definir como la ciencia de la energía. En la descripción general es el estudio de convertir el calor en energía. Esta ciencia es uno de los más importantes en este estudio ya que se requiere transferir calor a otro elemento. Dentro del proceso de generación de cizallamiento, se acopla un horno para transferir el calor a las láminas de magnesio. Al administrar calor al elemento, eleva la maleabilidad en los procesos de manufactura.

2.3.5. Diseño

El diseño se puede definir como “el proceso de aplicar varias técnicas y principios científicos con el propósito de definir un dispositivo, un proceso o un sistema con detalles suficientes para su realización”.

El proceso de diseño son etapas que conducen a estructurar un problema y ayudan a conducir a una solución viable. El proceso es una secuencia lógica de pasos a partir de los datos de entrada pero no necesariamente es de progresión lineal, inicialmente se realizan suposiciones validas que se prueban, se comparan, y se corrigen y se vuelven a probar de forma iterativa para satisfacer las condiciones y requerimientos del problema.

Los pasos del proceso de diseño son:

- Diseño preliminar:
 - Planteamiento inicial de la necesidad
 - Estado del arte del problema
 - Recolección de datos cuantitativos y cualitativos
 - Definición de la solución del problema

- Diseño básico:
 - División en subsistemas
 - Planteamiento de alternativas de solución de subsistemas
 - Selección de alternativas de solución
 - Integración

- Diseño de detalle
 - Selección de elementos comerciales
 - Síntesis y análisis de piezas
 - Integración
 - Planos de ensamble y de taller

- Prototipo y pruebas
 - Prototipos: virtuales (CAD 3D, CAE) y reales
 - Pruebas dinámicas
 - Retroalimentación

- Diseño definitivo
 - Planos definitivos: detalle, taller, ensamble y explosión
 - Diseño de detalle estético y especificación acabados
 - Construcción de la pieza en serie

2.4. PLANTEAMIENTO INICIAL DE LA NECESIDAD

Las aleaciones de magnesio fueron ampliamente utilizadas en la segunda guerra mundial, específicamente para aplicaciones militares. En la figura 8 se puede observar todo tipo de aplicaciones donde fueron utilizadas las aleaciones de magnesio durante la segunda guerra mundial. Al terminar la segunda guerra mundial, se consideraban que las láminas de aleaciones de magnesio, principalmente obtenidas por fundición, no eran aptas para aplicaciones de medios de transporte. Debido a este resultado, las grandes empresas productoras de magnesio tuvieron dificultades por la poca demanda y muchas empresas no lograron seguir con la producción de estas láminas (Friedrich & Mordike, 2006).

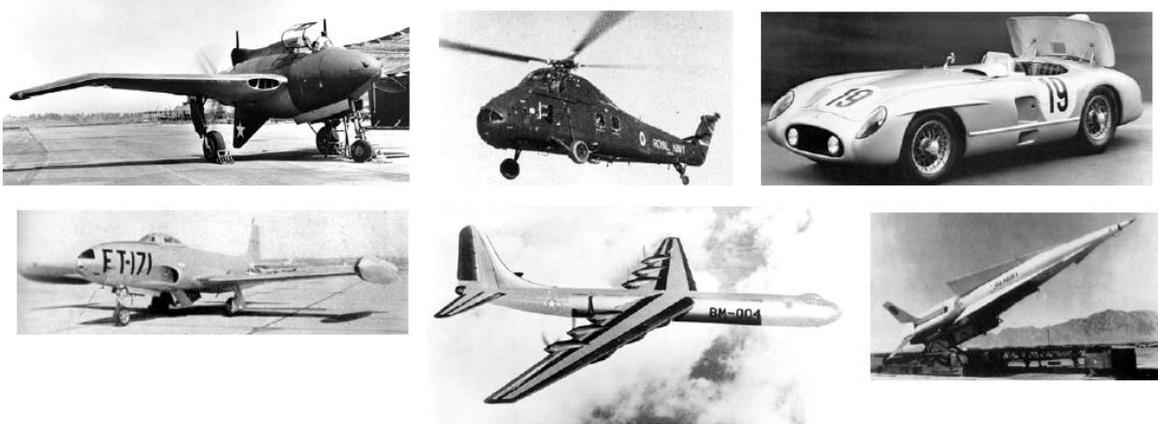


Figura 8. Aplicaciones Durante la Segunda Guerra Mundial

Recientemente se ha vuelto de gran interés el estudio y desarrollo de láminas de aleaciones de magnesio, por su alta resistencia específica. El inconveniente de las aleaciones de magnesio es su conformabilidad y por esta razón, no es posible obtener formas complejas. De los requerimientos que se requieren para aplicaciones de ingeniería, los más importantes son las cargas que soportara el material. Las aleaciones de magnesio tienen propiedades más elevadas cuando son por procesos por forja que por fundición y por esta razón, la necesidad de obtener formas complejas con las láminas.

Estudios recientes han confirmado que por medio de refinamiento de granos de las láminas de magnesio, es posible mejorar considerablemente la conformabilidad de las láminas a temperatura ambiente. Se desea diseñar un prototipo que permita obtener muestras para la caracterización de las láminas procesadas por medio de la deformación plástica severa.

2.5. ESTADO DEL ARTE

En esta sección se describirán los mecanismos existentes que generan deformación por cizallamiento en aleaciones de magnesio. Como es una investigación relativamente nueva, la cantidad disponible de información acerca de los dispositivos de deformación es limitada. Se requiere una mayor cantidad de información para cada uno de los mecanismos para poder evaluar y diseñar un mecanismo que más se ajuste a los requerimientos del diseño.

En los últimos años, el estudio y la fabricación de metales con microestructura de granos finos mediante una deformación plástica severa (SPD) o también conocido como generación de cizallamiento, ha estado evolucionando con gran rapidez. Estos procesos tienen como fin desarrollar nuevos materiales con mejores propiedades mecánicas y propiedades funcionales para aplicaciones avanzadas. Los procesos de deformación plástica severa o generación de cizallamiento deben imponer altos esfuerzos a una temperatura relativamente bajo sin un cambio significativo en las dimensiones de la pieza deformada.

A continuación, se presentan los mecanismos que generan deformación por cizallamiento para plantear alternativas del diseño para el prototipo.

2.5.1. *Equal channel angular extrusion (ECAE) o Equal channel angular pressing (ECAP)*

El *equal channel angular extrusión* (ECAE) o también conocido como *equal channel angular pressing* (ECAP) fue desarrollada en la Unión Soviética por Vladimir Segal y es una de las técnicas más estudiadas. Es un proceso que genera una deformación plástica severa aplicando grandes esfuerzos sobre el material generando cizalladura. (Nagasekhar, Chakkingal, & Venugopal, 2006).

Es un procedimiento que consiste en extruir una pieza metálica por dos canales, o dados, de igual sección transversal que se interceptan en un ángulo y genera una deformación por cizalladura a la pieza de trabajo. Los valores típicos para el ángulo de intersección se encuentran entre los 90° y 150°. En la figura 9 se ilustra el esquema del (ECAE).(Nagasekhar, Chakkingal, & Venugopal, 2006)

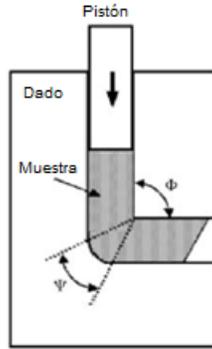


Figura 9. Esquema del dispositivo ECAE. (Zehetbauer & Zhu, 2009).

Una de las ventajas que tiene el mecanismo *equal channel angular extrusión* es que las láminas no sufren cambios significativos en las secciones transversales en el momento de generar cizalladura en el material, y por esta razón, la posibilidad de repetir el proceso las veces necesarias. Se recomienda cambiar la orientación después de cada etapa para obtener una microestructura fina y homogénea a través de todas las superficies. (Senkov, Miracle, & Firstov, 2004). En la figura 10 se observan los cuatro rutas factibles del proceso. Hay que tener en cuenta algunas variables que pueden modificar la cantidad y homogeneidad de las deformaciones, como el ángulo de interceptación, bordes de redondeo, rugosidad, fricción, transferencia de calor, etc. Este proceso es inadecuado para fabricar láminas anchas, puesto que el proceso de extrusión es lento y de alto consumo energético. (Hu, Pan, & Zhang, 2010).

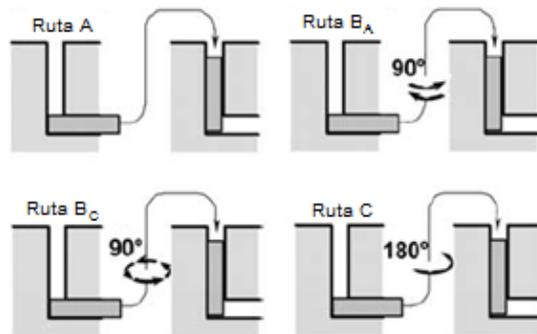


Figura 10. Cuatro rutas diferentes para el mismo proceso.

Se han demostrado que también es posible realizar el ECAE con las aleaciones de magnesio a una temperatura mayor de los 250°C debido al aumento de actividad de los sistemas de deslizamiento no basal, sin embargo el tamaño mínimo promedio de los grano que se pudieron obtener después del proceso no eran mayores de 2µm, no fue posible reducir más el tamaño de grano debido al hecho de que la temperatura de deformación en todos los casos fue superior de la temperatura de recrystalización. ($T_{deformacion} > 0.4T_M$). (Figueiredo, Terzi, & Langdon, 2010). Debido a las consideraciones anteriores, se planteó procesar las

aleaciones de magnesio a una temperatura por debajo de la recristalización, para obtener granos más finos mejorando la conformabilidad e incremento de las propiedades mecánicas.

A una temperatura baja, por debajo de los 200°C, las aleaciones de magnesio AZ31 exhiben fracturas caracterizadas por la formación de segmentos a lo largo de la dirección de extrusión cuando se aplica una baja velocidad de deformación. (Figueiredo, Terzi, & Langdon, 2010)

En la tabla 6 se puede observar un resumen del comportamiento plástico de las aleaciones de magnesio cuando son procesadas por ECAP. Se reportan los parámetros más significativos tales como; la cantidad de repeticiones del proceso, el ángulo de cizallamiento, la temperatura de trabajo, la temperatura óptima para obtener la superelasticidad y la máxima elongación bajo las condiciones óptimas para la prueba de tensión. (Figueiredo, Terzi, & Langdon, 2010)

Tabla 6. Resumen de las condiciones óptimas para la superelasticidad en las aleaciones de magnesio con ECAP. (Figueiredo, Terzi, & Langdon, 2010)

Aleación	Parámetros ECAP			Temperatura óptima para superelasticidad (K)	Elongación Máxima (%)
	Cantidad repetición	Angulo dado (°)	Temperatura (K)		
AZ31	8	110	473	423	460
AZ31	6	110	473	450	430
AZ31	6	90	423	623	1210
AZ31	4	110	473	623	960
AZ31	4	110	473	623	1030
AZ61	4	90	473	473	1320
AZ61	6	90	448-473	448	1190
AZ91	8	90	423-538	523	500
AZ91	6	90	448	473	956
AZ91	8	90	448	473	661
AZ91	6	90	473-523	573	570
ZK40	3	90	523	523	612
ZK40	3	90	523	523	612
ZK60	8	90	433	473	1083
ZK60	6	90	453-503	533	960
ZK60	6	90	473	493	2040
ZK60	6	90	473	473	1310
ZK60	2	90	473	473	3050
ZK60	6	90	473	450	1330
ZK60	6	90	513	513	530
ZK60	6	90	513	513	810
Mg7.5Al0.2Zr	2	90	473	448	760
Mg9Al	2	90	473	473	840
Mg8Li	4	135	293	473	1780
Mg8Li	4	135	293	473	1610
Mg8Li	2	110	473	473	970
Mg0.6Zr	1	90	573	573	420

En la figura 11 se puede observar que mientras más se reduzca el tamaño de grano en el magnesio puro en el ECAE, la dureza del material aumenta, cumpliendo de esta manera la relación de Hall-etch. (Biswas, Dhinwal, & Suwas, 2010).

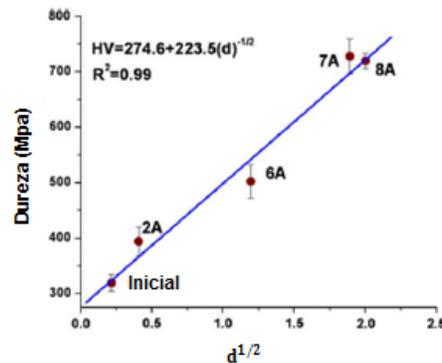


Figura 11. Grafica de dureza vs. tamaño de grano. (Biswas, Dhinwal, & Suwas, 2010)

Se debe tener en cuenta una gran cantidad de parámetros de entrada para que el proceso ECAE se realice de forma adecuada. En la tabla 7 se observan las variables más importantes a tener en cuenta en el momento de realizar el proceso. Cuando las variables procesadas no son ajustadas correctamente, la posibilidad del desgaste y falla tanto en el material de prueba como en las piezas de la maquina son muy altas. (Zehetbauer & Zhu, 2009)

Tabla 7. Variables de proceso para el ECAE. (Zehetbauer & Zhu, 2009)

Propiedades principales	Área técnico
Propiedades de la pieza	figura (bloque, cilindro) y el tamaño, composición química y microestructura, propiedades de flujo durante las condiciones de proceso (esfuerzo en función de la deformación, velocidad de deformación y temperatura, propiedades físicas y térmicas)
Dados y herramientas	geometría (forma, ángulo del canal, ángulo chaflán, contrapresión, cantidad de ángulos, tamaño del canal), condiciones de superficie, dureza del material, revestimiento de la superficie, temperatura, rigidez y precisión.
Condiciones de interface	acabado de superficie, lubricación, fricción, transferencia de calor
Zona de deformación	mecanismos de deformación plástica, flujo del material, esfuerzos, velocidades, temperaturas
Equipos	velocidad, tasa de producción, capacidades de esfuerzo y energía, rigidez y precisión.
Ruta de proceso	numero de repeticiones (A, Ba, Bc, C o una modificada), dirección de entrada

Se ha estudiado y confirmado el potencial para obtener comportamientos superplásticos en las aleaciones de magnesio a bajas temperaturas mediante el ECAE pero las muestras que se obtienen tienen la forma de barras con sección transversal cuadrada o circular con una longitud relativamente corta y la técnica no es apropiada para aplicar cizallamiento en láminas y placas. (Kim, Park, Wang, & Yoon, 2007).

2.5.2. *High-pressure torsion* (HPT)

High-pressure torsion (HPT), significa torsión de alta presión. En este proceso se coloca una muestra, con forma de disco, en una cavidad dentro de unos émbolos donde se aplica una presión hidrostática para generar torsión a la muestra. En la figura 12 se puede ver el esquema del dispositivo. Para procesos con presiones altas, se modifican la geometría de las cavidades. Este procedimiento es atractivo para producir pequeñas muestras nanomagnéticas con propiedades magnéticas mejoradas y para dispositivos con aplicaciones en sistemas micro electromecánicos. (Zehetbauer & Zhu, 2009)

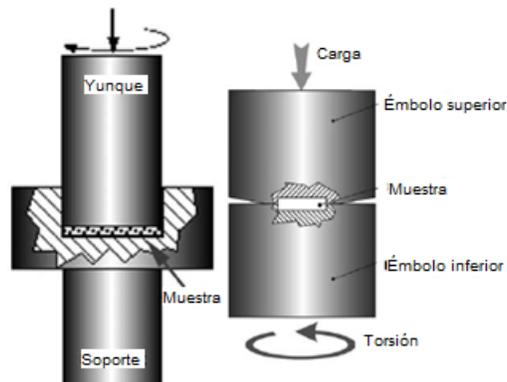


Figura 12. Proceso *High-pressure torsion*. (Zehetbauer & Zhu, 2009).

En los experimentos iniciales, investigadores creían que era posible obtener una muestra homogénea trabajando con bajas revoluciones. Sin embargo, se realizaron experimentos de forma minuciosa y se rechazó la teoría expuesta. Para un experimento de HPT ideal, la deformación en la muestra va disminuyendo al distanciarse del centro de rotación del eje. (Zehetbauer & Zhu, 2009). Experimentos realizados sobre acero austenítico (~15wt%Cr, 25wt%Ni), utilizando muestra de 8 mm de diámetro y aplicando una presión hidrostática nominal de $p=5.3$ GPa. Se obtuvieron resultados donde no hay una deformación considerable en el centro de la muestra, por lo que no es posible obtener una muestra completamente homogénea en este proceso. Este estudio demostró experimentalmente que el centro de la muestra presenta una baja dureza y se va incrementando al aumentar el radio. La cantidad de revoluciones (n) también afectaban la dureza del material,

entre más revoluciones sean aplicadas, más dureza adquiriría la muestra, ver figura 13. (Vorhauer & Pippan, 2004)

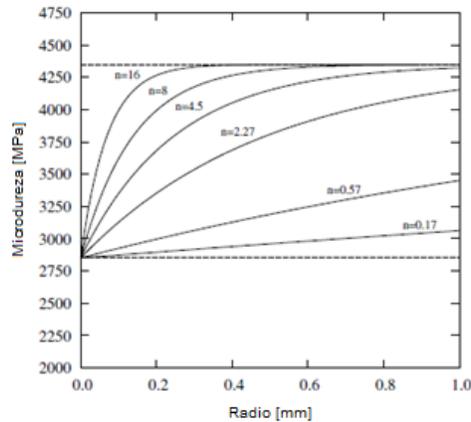


Figura 13. La dureza en función del radio a diferentes revoluciones. (Vorhauer & Pippan, 2004)

Una de las ventajas que ofrece este proceso es la facilidad de generar altas deformaciones de forma muy sencilla. Trabajos realizados sobre muestras de 0.8 mm de espesor, deformadas con una sola revolución, permitió obtener una deformación equivalente de aproximadamente 18, a una distancia de 4 mm del centro de rotación de la muestra, si se aplica 100 revoluciones, la deformación equivalente es de 1800. Estas grandes cantidades de deformación equivalente son muy difíciles de obtener en otros procesos. (Zehetbauer & Zhu, 2009)

Este proceso también permite trabajar materiales relativamente frágiles como materiales de alta resistencia a temperatura ambiente, lo cual es muy difícil de lograr con el empleo de otros procesos de refinamiento de grano. La desventaja de este proceso es la incapacidad de trabajar en aplicaciones industriales de gran tamaño, ya que en este se requieren que las propiedades del material sean homogéneas. Como este proceso tiene una dependencia del radio con respecto a la deformación, es difícil obtener un material completamente homogéneo. (Zehetbauer & Zhu, 2009).

2.5.3. *Multi-directional forging (MDF)*

Este proceso fue aplicado por primera vez en 1990 para obtener palanquillas con estructura de granos finos, consiste en operaciones de forja tradicional. Cuando se está realizando la forja, se debe de cambiar el lado de la aplicación de la carga para obtener una pieza lo más homogénea posible. Comparando con otros procesos de refinamiento de granos, la homogeneidad de las piezas que se obtiene es muy baja. Este proceso se utiliza principalmente para materiales frágiles debido a que se trabaja a temperaturas elevadas al principio del proceso y las cargas específicas de las herramientas son relativamente bajas. La temperatura de trabajo para este proceso se encuentra en un intervalo de 0.1 –

$0.5T_m$, donde T_m es la temperatura de fusión. (Zehetbauer & Zhu, 2009). En la figura 14 se puede observar cómo se realiza el proceso MDF.

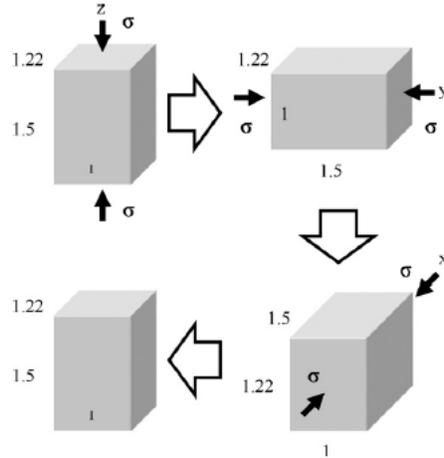


Figura 14. Proceso de forja multidireccional. (Nakao & Miura, 2010)

En el proceso MDF se utilizaron barras de aleación de magnesio AZ31 con dimensiones de 21mm de ancho, 14mm de espesor y con una longitud de 31mm. Las muestras fueron recocidas a una temperatura de 733K por 7.2×10^3 s, obteniendo un tamaño de grano promedio de 22 μm . Las muestras fueron deformando a una velocidad de $3 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ y se fue disminuyendo la temperatura de 623 k a 423 k, enfriando en agua después de cada pasada. El tamaño de grano después de la primera pasada por el proceso disminuyo a 6.7 μm a una temperatura de 623K, a la cuarta pasada se obtuvo un tamaño de grano de 0.8 μm a una temperatura de 473K, a la quinta pasada a 443K se pudo obtener granos de 0.5 μm (Yang, Sun, Xing, Miura, & Sakai, 2008).

En la Figura 15, se puede observar cómo se obtuvieron las muestras para la caracterización. Se obtuvieron muestras con diferentes ángulos de orientación, 0°, 45° y 90°, para determinar la homogeneidad de las muestras procesadas.

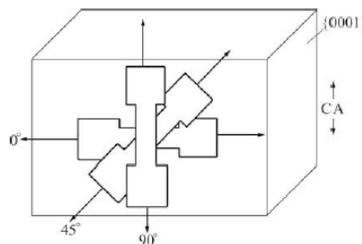


Figura 15. Muestra de ensayo a tracción con ángulo de inclinación de 0°, 45° y 90°. (Yang, Sun, Xing, Miura, & Sakai, 2008)

En la figura 16 se observan las curvas de los efectos de la anisotropía de las muestras en la curva esfuerzo deformación. Se puede observar que la anisotropía, dependiendo de la orientación, y la velocidad de deformación afectan la respuesta de las curvas esfuerzo-deformación. A una velocidad de deformación

de $3 \times 10^{-3} s^{-1}$, es evidente que la anisotropía afecta el esfuerzo del material y a una velocidad de $3 \times 10^{-5} s^{-1}$, hay un mayor porcentaje de deformación. (Yang, Sun, Xing, Miura, & Sakai, 2008).

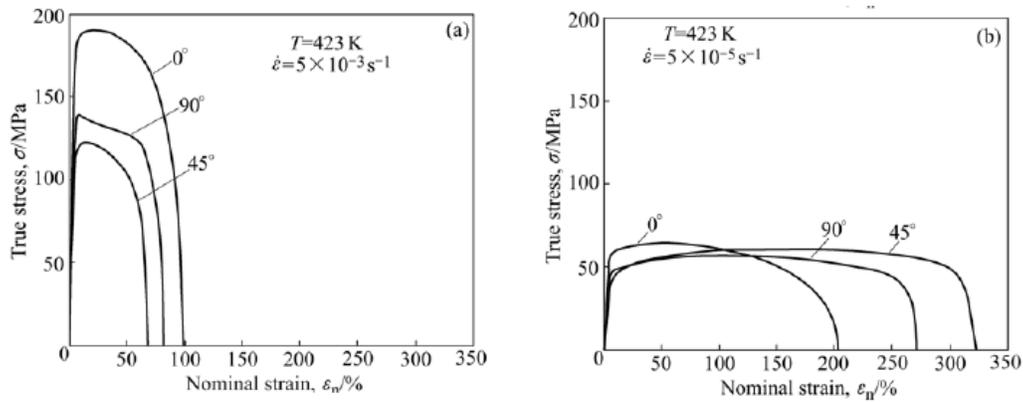


Figura 16. Efectos de anisotropía en las curvas de esfuerzo-deformación en las aleaciones AZ31 a una temperatura de 423. (Yang, Sun, Xing, Miura, & Sakai, 2008)

En la figura 17 se puede observar el cambio de tamaño de grano de la aleación AZ31 durante el proceso isotérmico y también durante una rampa de temperatura decreciente. Durante el proceso isotérmico, el tamaño de grano se mantuvo constante, aproximadamente $4.7\ \mu\text{m}$ con una deformación equivalente de $\Delta\epsilon=4.8$. Cuando se realiza el proceso con temperaturas decrecientes, el tamaño de grano disminuye considerablemente alcanzando un valor mínimo menor a $0.5\ \mu\text{m}$ a 423K (Yang, Sun, Xing, Miura, & Sakai, 2008).

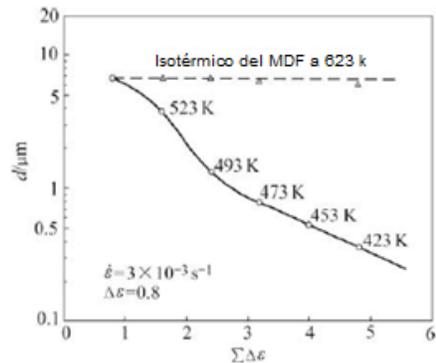


Figura 17. Tamaño de grano en AZ31 en el proceso MDF a temperaturas constantes y decrecientes. (Yang, Sun, Xing, Miura, & Sakai, 2008)

2.5.4. Cyclic extrusion and compression (CEC)

Este método es conocido también como prensado en reloj de arena. Se empuja una muestra por un canal con diámetro menor y sale por otro canal con un diámetro similar que en la entrada. Es un proceso cíclico ya que inicialmente el material experimenta extrusión, después sigue la etapa de compresión y al final se

vuelve a dar la extrusión. Ver figura 18 para ver el proceso del CEC. (Zehetbauer & Zhu, 2009)

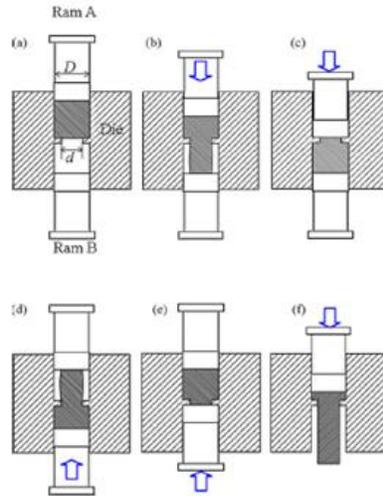


Figura 18. Proceso cíclico de extrusión y compresión.

En estudios realizados por Chen en el 2007 utilizando una aleación AZ31, se encontró que por medio del proceso CEC y aplicando una velocidad de extrusión de 7 mm/s, se logra realizar un refinamiento de grano, como se muestra en la figura 19, donde se obtiene tamaño de granos de aproximadamente 2 μm después de la séptima pasada. Este comportamiento del material es debido a la recristalización dinámica. Cuando se realiza la primera etapa de deformación, se logra un alto grado de refinamiento como se observa en la figura 19b, lo que muestra la eficiencia en el refinamiento de la estructura. (Chen, y otros, 2007).

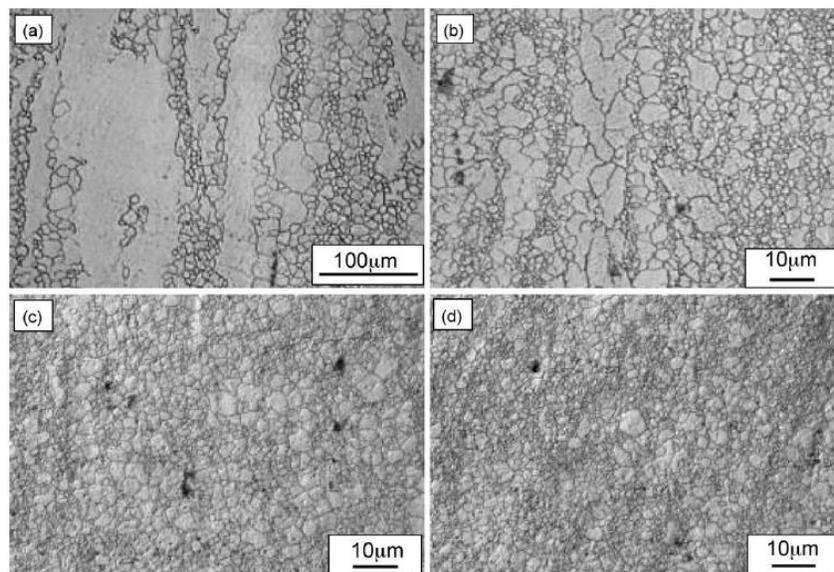


Figura 19. Visto a través de la microscopía óptica a) Inicial b) 1 pasada por el CEC c) 3 pasadas por el CEC d) 7 pasadas por el CEC. (Chen, y otros, 2007)

En otro estudio se analizó la evolución de la microestructura de la lámina de aleación ZK60 durante el proceso CEC y su relación entre la textura cristalográfica y la propiedad mecánica, aplicando una velocidad de extrusión de 8 mm/s y a una temperatura de 230°C. Se evidencio que mientras más pasadas se realizaban, se obtenían granos más finos y de mayor homogeneidad. En la tabla 8 se puede observar como disminuyen la resistencia a la fluencia promedio (σ_{YS}) y el esfuerzo ultimo (σ_{UTS}), mientras aumenta la elongación (δ), para las láminas a medida que incrementa el número de pasadas. (Lin, Wang, Peng, & Roven, 2008)

Tabla 8. Resumen de propiedades mecánicas con el CEC. (Lin, Wang, Peng, & Roven, 2008)

Muestras (# repeticiones)	$\sigma_{YS}(MPa)$	$\sigma_{UTS}(MPa)$	δ (%)
Muestra original	248	316	13.9
1	261	330	15.3
2	235	312	24.7
3	215	289	37.8

2.5.5. *Twist extrusion* (TE)

Este proceso fue introducido en 2004. Consiste en extruir la pieza por un canal donde su área transversal se conserva mientras se retuerce con un ángulo alrededor del eje longitudinal. Como la pieza de trabajo recupera su geometría, es posible repetir el proceso. Para este dispositivo, la única restricción de geometría son aquellas con sección transversal circular. En la figura 20 se puede observar el esquema del TE. (Zehetbauer & Zhu, 2009)

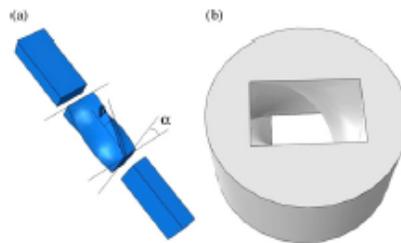


Figura 20. Proceso de extrusión con retorcadura.

En los estudios realizados, se tomó aluminio de alta pureza (99.99%) y se procesó mediante *twist extrusión* a temperatura ambiente generando una rotación del material con un ángulo de 60° a una velocidad de 3 mm/s con una presión de 200 MPa. Se encontró que después de la cuarta pasada, se logró generar una deformación, incrementando la resistencia, el esfuerzo último, el límite elástico de las muestras con una disminución moderada de la ductilidad como se muestra en la tabla 9. Este proceso se repitió 4 veces y no se realizó ninguna rotación a la pieza ya que no tiene ningún efecto en la deformación plástica debido a su simetría axial (Orlov, Beygelzimer, Synkov, Varyukhin, Tsuji, & Horita, 2009).

Tabla 9. Propiedad a tracción de Al puro antes y después del TE. (Orlov, Beygelzimer, Synkov, Varyukhin, Tsuji, & Horita, 2009)

Condición de la muestra	Posición y dirección de la muestra	YS^a (MPa)	UTS^b (MPa)	Eu^c (%)	Ef^d (%)
Recocido	ED, 1	47.8	143.37	43	74.67
	ED, 2	43.09	146.36	40	78.83
	ED, 4	49.77	170.41	47	88.33
	TF, lado izq.	39.36	143.52	40	79.83
	TD, centro	26.66	122.82	38	77.17
	TD, lado der.	30.74	126.38	31	63.33
1 Pasada por el TE	ED, 1	162.19	203.08	18	53.33
	ED, 2	196.64	206.05	12	43.67
	ED, 3	197.14	203.74	10	39.50
	ED, 4	194.60	196.18	8	44.50
	TF, lado izq.	154.94	177.66	5	36.33
	TD, centro	165.77	175.31	12	44.00
	TD, lado der.	171.79	189.14	9	43.17
4 Pasadas por el TE	ED, 1	195.97	201.30	14	45.17
	ED, 2	186.36	194.17	10	46.00
	ED, 3	194.73	215.98	11	50.83
	ED, 4	199.93	201.56	13	41.83
	TF, lado izq.	166	195.22	6	42.67
	TD, centro	193.18	193.43	4	36.17
	TD, lado der.	199.8	213.18	7	37.00

^a Límite elástico

^b Resistencia a la tracción

^c Elongación uniforme

^d Elongación a la rotura

2.5.6. Differential speed rolling (DSR)

Este mecanismo consiste en 2 rodillos del mismo diámetro que giran en sentidos opuestos y a velocidades diferentes. Este proceso es similar a una laminadora convencional, la diferencia radica en las velocidades de los rodillos. Este proceso genera una deformación significativa en el área transversal de la lámina lo cual dificulta la posibilidad de repetir el proceso de cizalladura. La superficie de los rodillos son calentados durante el proceso para mantener la misma temperatura de las láminas precalentadas. En la figura 21 se ilustra el esquema del dispositivo DSR (Ji & Park, 2008).

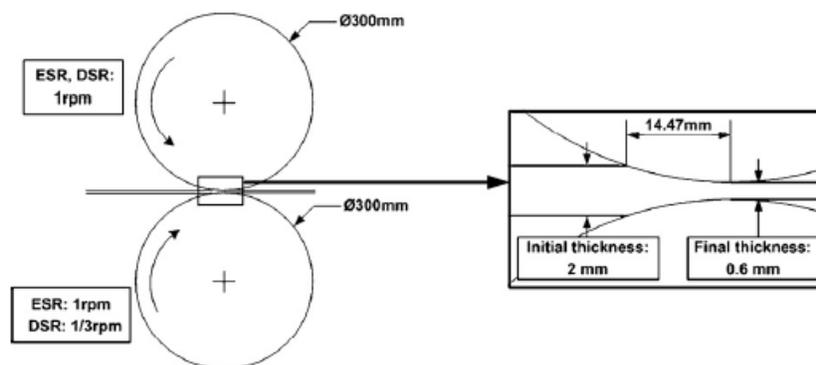


Figura 21. Esquema del dispositivo DSR. (Ji & Park, 2008)

Investigaciones realizadas analizaron las propiedades termomecánicas para las láminas de aleaciones de magnesio AZ31 durante el proceso DSR utilizando una relación de velocidad de 3:1 entre el rodillo superior e inferior, con el rodillo superior girando a 1rpm en sentido opuesto de las manecillas del reloj y el rodillo

inferior girando a 1/3 rpm a sentido de las manecillas del reloj. El proceso fue realizado a temperaturas de 150°C, 200°C y 250°C.

Para la investigación, se utiliza láminas de AZ31 con un ancho 140 mm y un espesor de 2 mm. Las láminas fueron reducidas a un ancho de 1.4 mm y 0.6 mm, que corresponden a 30% y 70% de reducción de espesor respectivamente. La superficie de los rodillos fueron calentados para mantener la temperatura de las láminas.

En la figura 22(a) se puede observar los granos de láminas comerciales con unos granos gruesos y equiaxiales con diámetros de 30-60 μm . La figura 22(b) es el resultado cuando se redujo el espesor de la lámina a un 30% y muestra una recristalización parcial hasta de un 30%, con granos que miden 3-4 μm a una temperatura de 150°C. Cuando el espesor de la lámina fue reducida a un 70% con la misma temperatura, se generó una recristalización del 50% con granos más finos con un tamaño de 1-2 μm , ver figura 22(c). Al aumentar la temperatura a 200°C para la misma reducción de espesor del 70%, se obtuvo una región completamente recristalizado con granos uniformes que median 2.5 μm , como se muestra en la figura 22(d). (Ji & Park, 2008) (Watanabe, Mukai, & Ishikawa, 2006)

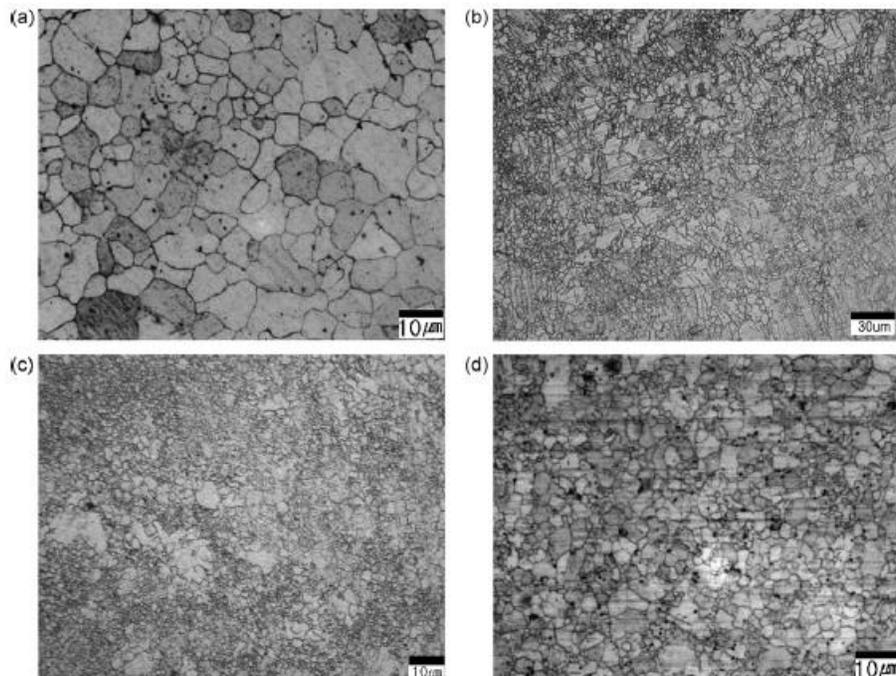


Figura 22. Microscopia óptica por el proceso DSR a) comercial b) después de 30% de reducción a 150°C c) después de 70% de reducción a 150°C d) después de 70% de reducción a 200°C. (Ji & Park, 2008).

2.5.7. Accumulative roll bonding (ARB)

Este proceso utiliza el mecanismo de una laminadora tradicional. Inicialmente se ingresa la muestra por la laminadora para reducirla a un espesor deseado. La muestra se corta por la mitad y se coloca uno encima del otro. La muestra es laminado otra vez para unir las dos láminas cortadas y obtener el espesor deseado, recuperando el espesor inicial. Este proceso se puede repetir hasta acumular la deformación deseada y permitida por el material. Por lo general el proceso ARB se debe realizar a temperaturas por debajo de la temperatura de recristalización. En la figura 23 se puede observar el diagrama del proceso ARB. (Zehetbauer & Zhu, 2009)

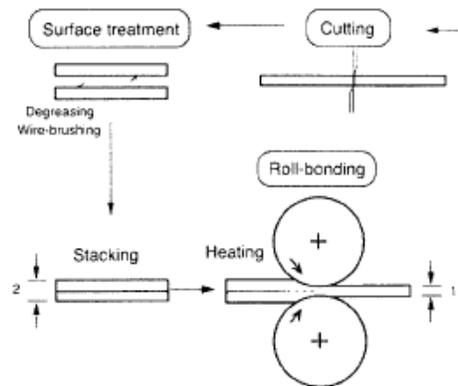


Figura 23. Proceso de unión por laminado acumulativa. (Zehetbauer & Zhu, 2009)

En uno de los estudios utilizando el proceso ARB, se redujo una lámina de aleación AZ31 a un 50% de su espesor inicial. Se cortó la lámina y se colocó una encima de la otra para laminar nuevamente y obtener el espesor final. Se repitió el proceso 3 veces. Se intentó trabajar a temperaturas de 300 y 400°C, obteniendo granos equiaxiales de forma homogénea. En este proceso, la laminación se realizó sin lubricación para generar una gran cantidad de deformación por cizallamiento bajo la superficie de la lámina. Como la deformación se genera en la superficie, esta se ubica en el interior en el momento de la unión de las láminas para obtener una muestra homogénea. (Zhan, Li, & Chen, 2007).

En la tabla 10 se compara el tamaño de grano obtenido por el ECAP y ARB para una aleación de magnesio AZ31. Los resultados se obtuvieron modificando la temperatura y la cantidad de repeticiones del proceso. Se puede observar que como el ECAP, el proceso ARB es efectivo para reducir el tamaño de grano y cuando se trabaja a bajas temperaturas, es posible disminuir aún más el tamaño de los granos. La fragilidad de la aleación AZ31 se debe a su estructura cristalina y cuando se realiza laminación, se generan concentradores de esfuerzos y fisuras en el material. Se puede observar como varían las propiedades mecánicas de la lámina. Se puede concluir que el esfuerzo a la fluencia disminuyó al procesar mediante ARB a pesar de reducir el tamaño de los granos y hay un incremento en la ductilidad de las láminas, cuando aumenta la temperatura de procesado. (Zhan, Li, & Chen, 2007).

Tabla 10. Comparación del AZ31 en el proceso ECAP y ARB. (Zhan, Li, & Chen, 2007)

Condición	Repeticiones	Temperatura procesada (C°)	Deformación	Tamaño de grano (µm)
ECAP	1	320	1	8.1
	2	320	2	6.3
	3	250	3	4.3
	4	200	4	2.5
ARB	3	300	2.4	3.16
	3	400	2.4	3.45

Generalmente en el proceso de ARB no se utilizan lubricantes para lograr una buena unión entre las láminas. Se ha demostrado que para las láminas de aluminio, aun después de 7 ciclos en el proceso ARB, es difícil de obtener granos ultrafinos. (Lee, Tsuji, Utsunomiya, & Sakai, 2001).

En la tabla 11 se reportan varios resultados para una aleación de magnesio AZ31. Se obtuvo que el límite elástico es menor que las láminas sin procesar aun cuando se hizo un refinamiento de granos en el proceso, se puede observar que hubo un aumento en la ductilidad para las láminas después del proceso ARB; y por último, el esfuerzo último disminuye y la ductilidad aumenta con el incremento de la temperatura. (Zhan, Li, & Chen, 2007)

Tabla 11. Propiedades mecánicas de AZ31 comercial y procesado por el ARB, σ_b = resistencia a la tracción, σ_y = límite elástico. (Zhan, Li, & Chen, 2007)

Condición	σ_b (MPa)	σ_y (MPa)	Elongación
Comercial, longitudinal	369.3	320.3	4.1
Comercial, transversal	395.2	337.5	17.2
300 °C ARB, longitudinal	350.8	287.5	15.5
300 °C ARB, transversal	362.0	315.1	24.8
400 °C ARB, longitudinal	332.0	275.0	25.0
400 °C ARB, transversal	342.0	282.4	26.2

2.5.8. ECAP-Conform

Este mecanismo es la combinación del proceso de conformado y del proceso ECAP. Fue diseñado con el propósito de realizar deformación por cizallamiento de forma continuo con fines comerciales. El principio de funcionamiento se basa en generar suficiente fuerza de fricción para empujar la pieza de trabajo a través de un dado. La fuerza de fricción es generada por un eje giratorio que está ubicada en el centro del sistema y esta se encarga de que haya una alimentación continua del alambre. El alambre es doblado debido al dado fijo ubicado en el exterior del sistema donde esta se encarga de detener el material y obliga al material a doblar a un ángulo determinado, de forma similar al sistema ECAP. En la figura 24 se puede observar el esquema de la configuración ECAP-conform. (Zehetbauer & Zhu, 2009)

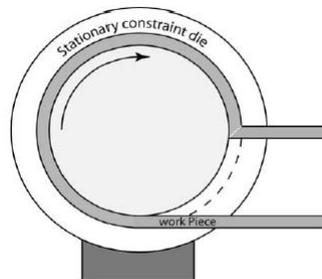


Figura 24. Configuración ECAP-conform. (Zehetbauer & Zhu, 2009)

Como se puede apreciar en la figura 25, el resultado que se obtiene de un alambre cuando se procesa por medio del mecanismo.

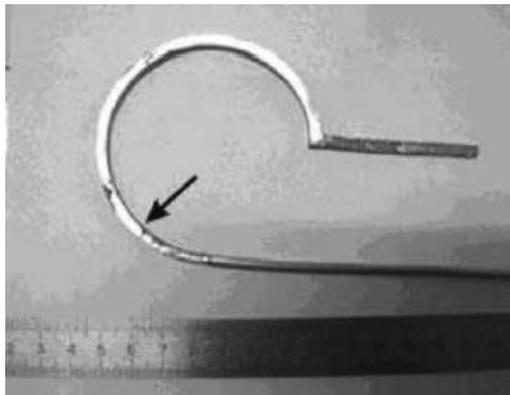


Figura 25. Alambre de aluminio por el proceso ECAP-Conform. (Zehetbauer & Zhu, 2009).

Los resultados obtenidos luego de la deformación por medio de este proceso son similares con los obtenidos mediante ECAP, donde es posible realizar el refinamiento de granos. En la tabla 12 se muestra la comparación de propiedades mecánicas como; límite de elasticidad ($\sigma_{0,2}$), esfuerzo ultimo (σ_u), elongación (δ) y reducción de área transversal (ψ), para un alambre de aluminio (Zehetbauer & Zhu, 2009).

Tabla 12. Comparación del alambre de Al inicial con respecto al obtenido en el proceso. (Zehetbauer & Zhu, 2009).

Condición	$\sigma_{0.2}(MPa)$	$\sigma_u(MPa)$	Deformación (%)	Ψ (%)
Comercial	47	71	28	86
1 pasada	130	160	13	73
2 repeticiones	130	170	12	72
3 repeticiones	130	160	14	76
4 repeticiones	140	180	14	76

2.5.9. Repetitive corrugation and straightening (RCS)

El ciclo básico de RCS consiste en dos pasos, la primera etapa consiste en corrugar la muestra con una maquina especialmente diseñada para esa función y la segunda etapa consiste en enderezar la muestra mediante el proceso de laminación convencional. En la figura 26a se puede observar el equipo para el proceso RCS, en la figura 26b se puede observar la foto ampliada de la herramienta encargada de la corrugación, en la figura 26c se puede observar la orientación inicial del material y la figura 26d se puede observar la muestra corrugada del material. (Huang, Zhu, Alexander, Liao, Lowe, & Asaro, 2003)

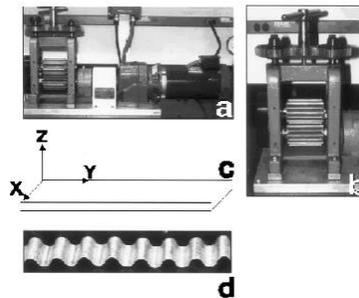


Figura 26. Equipo de corrugación y enderezamiento repetitivo. (Huang, Zhu, Alexander, Liao, Lowe, & Asaro, 2003)

En un estudio se aplicó el proceso RCS en láminas de cobre C11000 con un tamaño de grano inicial de $150 \mu m$. A las láminas se les aplicó la deformación y se repitió el proceso 18 veces a temperatura ambiente. Al final del proceso, la muestra tuvo una elongación 1.5 veces a la longitud original lo que significa que hubo un cambio en el área transversal de la muestra. Se pudo observar con el TEM que el tamaño de grano fue reducido a menos de 500 nm en todas las direcciones y sin elongación notable. Cuando se examinó por microscopía óptica, se pudo observar que después de las 18 repeticiones, los granos habían sido alargados a lo largo del eje x (Huang, Zhu, Alexander, Liao, Lowe, & Asaro, 2003). En la figura 27 se pueden observar los resultados

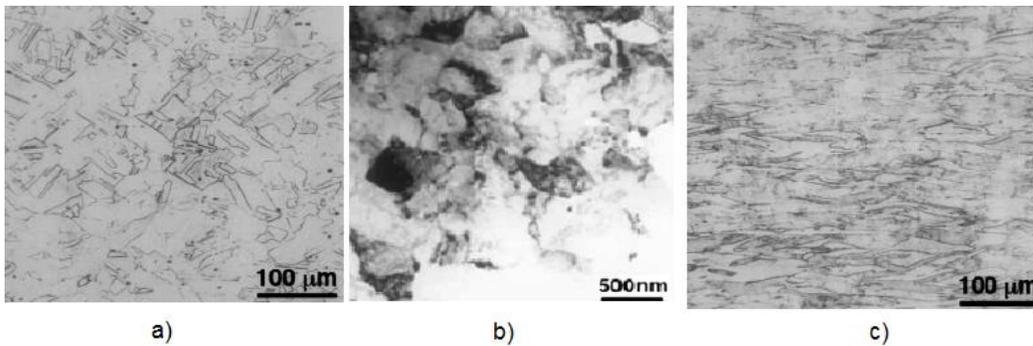


Figura 27. a) microscopía óptica antes del proceso RCS. b) TEM después del proceso. c) Microscopía óptica después del proceso en el plano longitudinal (plano x). (Huang, Zhu, Alexander, Liao, Lowe, & Asaro, 2003)

Se pudo comprobar que el proceso RCS, permite obtener granos nanoestructurados, sin embargo la cantidad de repeticiones que se pueden realizar en este proceso es limitada debido a que genera agrietamiento. Este diseño no tiene la capacidad suficiente para generar deformación plástica por cada ciclo para que sea efectivo en el refinamiento de grano. Una solución para resolver el problema es introducir una deformación por compresión en la superficie de la muestra. (Huang, Zhu, Alexander, Liao, Lowe, & Asaro, 2003)

2.5.10. Constrained Groove Pressing (CGP)

Este proceso consiste en 4 etapas, en la primera etapa se debe deformar la muestra, para esto se coloca la muestra en el dado de forma corrugada, lo cual tiene una cavidad con la misma dimensión que el espesor de la muestra. En la segunda etapa se coloca la muestra corrugada que se obtuvo de la primera etapa y procede con la etapa de enderezamiento, es similar a la primera etapa pero con la diferencia de los dados. La tercera y cuarta es la misma etapa que las etapas anteriores pero con la diferencia de que la muestra se rota 180° después de la segunda etapa. En la figura 28 se puede observar el proceso CGP. La repetición de este proceso puede generar grandes cantidades de deformaciones sin cambios en las dimensiones de la muestra (Zehetbauer & Zhu, 2009).

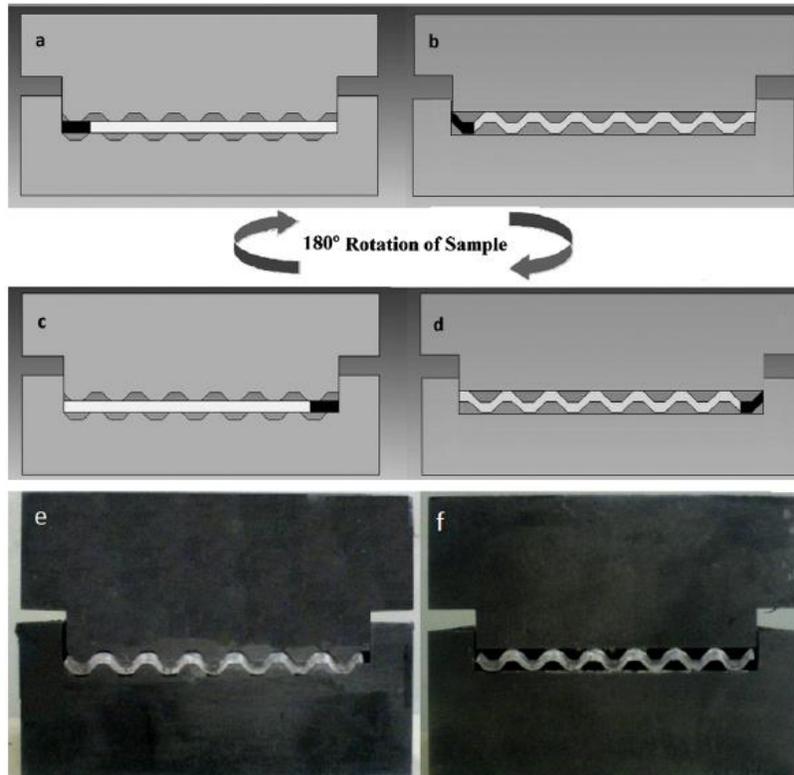


Figura 28. Proceso CGP a) etapa de corrugación b) etapa de enderezamiento c) etapa de corrugación con rotación d) etapa de enderezamiento con rotación e) imagen real de la etapa de corrugación f) imagen real de la etapa de enderezamiento. (Khakbaz & Kazeminezhad, 2011)

En uno de los estudios para el proceso CGP, se utilizó una lámina de aleación de aluminio AA3003 con una dimensión de $84 \times 70 \times 3 \text{ mm}^3$. Se realizaron pruebas de tracción según las normas ASTM E8M. Los ensayos se realizaron a temperatura ambiente. Con la difracción de rayos-x, se pudo observar que el tamaño de grano inicial era de $30\text{-}35 \mu\text{m}$ y después de la tercera repetición en el CGP se pudo obtener un tamaño de grano de 580 nm . El tamaño de grano en la primera y segunda pasada se redujo drásticamente pero después de la tercera, este se mantuvo constante. Comparado con el proceso ARB, este proceso tuvo mayor éxito en el refinamiento de grano aunque es posible que sea debido a la diferencia de temperatura de trabajo ya que en el proceso ARB, la temperatura de trabajo era de 200°C . A esta temperatura, la recuperación dinámica es mayor debido a la movilidad de dislocaciones y por esta razón no es posible refinar más los granos. En la figura 29 se puede observar la reducción del tamaño de grano por cada repetición en el proceso CGP. (Khakbaz & Kazeminezhad, 2011)

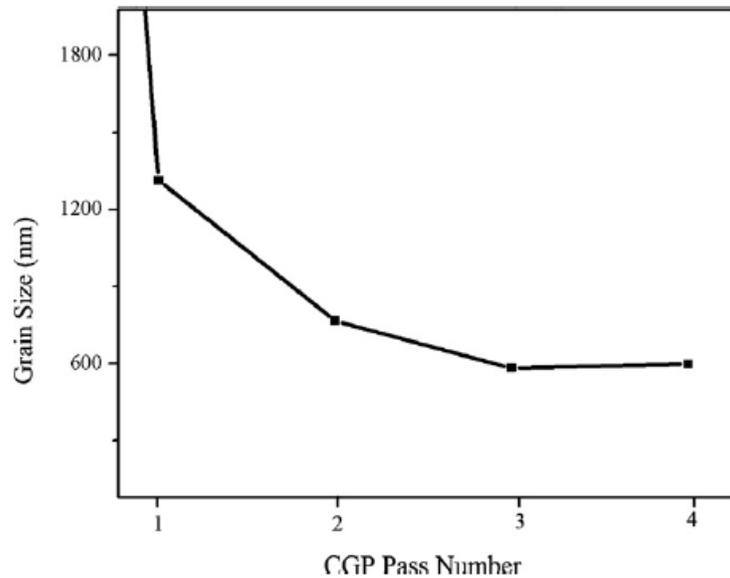


Figura 29. Tamaño de grano vs repetición en el proceso CGP. (Khakbaz & Kazeminezhad, 2011)

En la figura 30 se puede apreciar el comportamiento a tracción de las láminas comerciales y las procesadas. Se puede observar que la elongación uniforme se redujo de 0.39 mm/mm para las láminas comerciales mientras que las procesadas en el CGP a 0.05 mm/mm con tres pases. Para los procesos de trabajo en frío, hay una inestabilidad plástica en las primeras etapas de deformación y un aumento en la superplasticidad. (Khakbaz & Kazeminezhad, 2011)

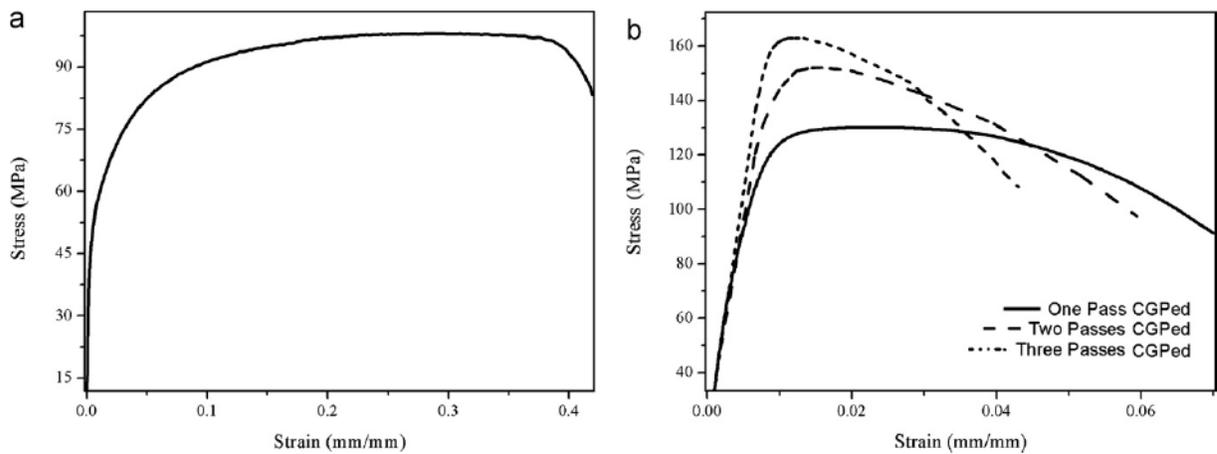


Figura 30. Comportamiento a tracción a) recocido b) CGP (Khakbaz & Kazeminezhad, 2011)

Este proceso tiene la dificultad de obtener una microestructura uniforme y homogénea ya que la deformación por cizallamiento se genera en los sectores de inclinación de los dados, no se genera deformación en los extremos superiores e inferiores. En la figura 31 se puede observar un esquema de los lugares donde existen estas deformaciones.

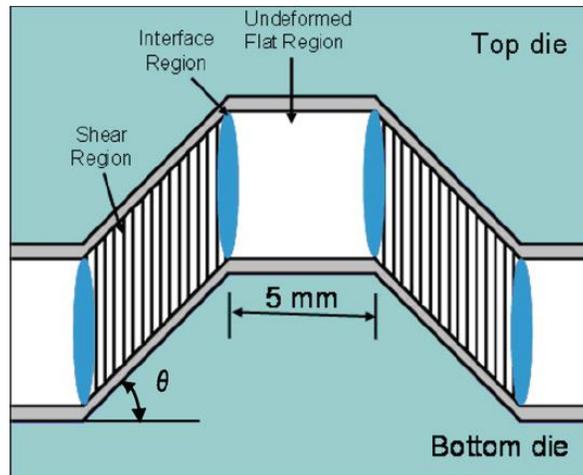


Figura 31. Esquema donde se genera deformación por cizallamiento en CGP. (Yoon, Krishnaiah, Chakkingal, & Kim, 2008).

2.5.11. *Conshearing Process*

Su nombre proviene de *continuous shearing deformation*. Este mecanismo fue diseñado para que la deformación por cizallamiento en las láminas fuera de forma continua. La idea surgió cuando investigadores querían mejorar el valor de Langford (valor r). Este parámetro indica la tendencia del material ante la conformación. En algunos metales como el cobre y el aluminio (fcc), cuando se hace el recocido después del proceso de laminado en frío, se forma una fuerte textura cristalográfica cubica lo cual impide el aumento del valor de Langford. Por otra parte, el cizallamiento es favorable para aumentar el valor de Langford. Esto es visible cuando se realiza deformación en el material en el proceso de rolado. (Zehetbauer & Zhu, 2009)

Este mecanismo consiste de un eje giratorio central para facilitar la alimentación de las láminas. En el exterior del eje central estarán ubicados varios rodillos satelitales que tienen como función guiar las láminas hasta el extremo interno del dado. La fuerza de fricción generada empuja la lámina por los dados. Las distancias entre los rodillos satelitales son las mismas y entre ellas tienen unas guías soportadas por unos resortes que tienen como fin guiar las láminas de forma segura. En la figura 32 se puede observar el esquema del dispositivo (Matsuzawa, Utsunomiya, Kawamoto, & Saito, 1998).

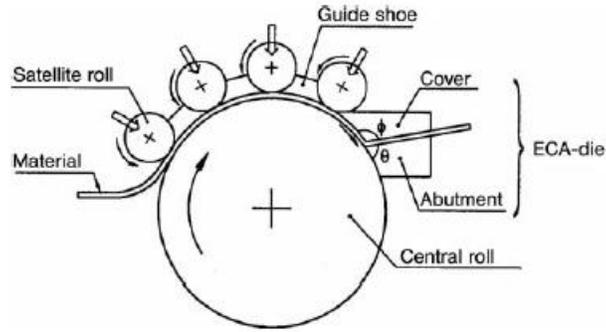


Figura 32. Esquema del dispositivo satellite-roll-rolling. (Zehetbauer & Zhu, 2009)

El proceso se realizó a temperatura ambiente con láminas de aluminio AA1100—H24 con dimensiones de 1.0 mm de espesor y 20 mm de ancho. El ángulo de trabajo fue $\theta=55^\circ$. Durante las pruebas se confirmó que después de pasar por el proceso 4 veces, no hay cambios en la resistencia a la tracción y tampoco en la elongación. Los resultados mostraron que hubo deformación por cizallamiento en el material y el valor de Langford fue aumentado de forma satisfactoria. (Zehetbauer & Zhu, 2009)

En otra investigación, se utilizaron láminas de aluminio AA1100 con espesor de 2 mm y con un ángulo de $\theta=65^\circ$ y se obtuvo que después de la sexta pasada por el *conshearing*, se obtuvieron granos ultrafinos, con un espesor de $0.42 \mu\text{m}$ y con una longitud de $1.4 \mu\text{m}$. La resistencia a la tracción aumento en un 70% y la falla por elongación disminuyo de un 50% a un 23%. (Zehetbauer & Zhu, 2009).

2.5.12. *Continuous Confined Strip Shearing (C2S2)*

Para mejorar las propiedades deseadas para láminas de aleación de magnesio, como la resistencia a la tracción y la conformabilidad, es común reducir el espesor del material por medio de rodado. Este proceso aumenta el costo de producción debido a los costos de los equipos, como laminadores en frío y caliente e instalaciones para el tratamiento térmico. Para reducir costos, se implementaron procesos de fundición para obtener las láminas, combinado con el laminado. Aunque haya reducido el costo, se encontraron con un problema, la dificultad de controlar la microestructura debido a que hay un límite para reducir el espesor. (Lee, Seok, & Suh, 2002).

La solución al problema mencionado anteriormente se puede resolver con uno de los procesos denotados como el *continuous confined strip shearing (C2S2)*. Este proceso es similar al *conshearing* y tiene como objetivo realizar deformación por cizallamiento en láminas de forma continua sin la necesidad de modificar el área transversal y por esta razón se puede realizar el proceso las veces necesarias. Este proceso fue desarrollado con el fin de mejorar la conformabilidad en láminas de aluminio. El eje de alimentación tiene un diseño especial para que pueda transmitir la fuerza necesaria para que las láminas puedan atravesar los canales.

En la figura 33 se ilustra el esquema del dispositivo C2S2 (Chung, Han, Lee, & Seok, 2001).

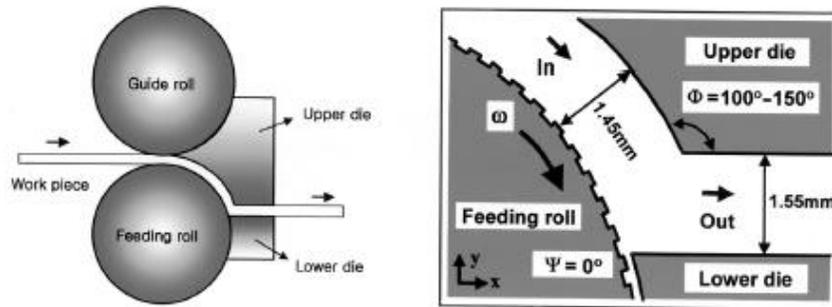
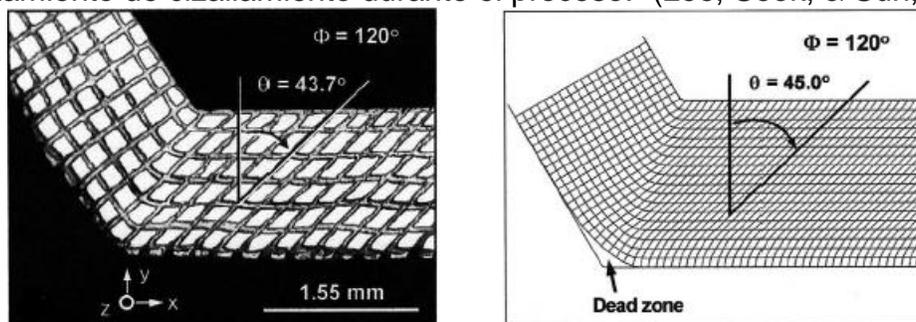


Figura 33. Esquema del dispositivo C2S2. (Chung, Han, Lee, & Seok, 2001)

En una de las investigaciones se ingresa una lámina de aleación de aluminio AA1050 con un espesor de 1.55 mm al sistema de los rodillos que tienen un diámetro de 10 cm cada uno. Durante la alimentación a través de los rodillos, se reduce el espesor de la lámina a 1.45 mm y es forzado a atravesar el dado debido a la fuerza de fricción por el eje motriz. Cuando la lámina sale de los dados, la lámina obtiene su espesor original (depende del canal). La velocidad del eje puede estar entre los 5 y 50 m/min. El ángulo de cizalladura (ϕ) puede variar entre los 100 y 150°. Al final se compararon los resultados a partir de las láminas obtenidos por el C2S2 y con el del proceso convencional, rolado en frío, encontrándose que en los procesos de C2S2, la deformación por cizallamiento no ocurre de forma uniforme, y es relativamente uniforme a través del espesor excepto en el borde inferior de curvado. La uniformidad de las láminas se comprobó por medio del análisis numérico, realizado con el método de elementos finitos y se comparó con respecto a los resultados experimentales del fenómeno de cizallamiento en las láminas. En la figura 34 se puede observar el comportamiento de cizallamiento durante el proceso. (Lee, Seok, & Suh, 2002)



a)

b)

Figura 34. a) Micrografía óptica b) análisis numérico. (Lee, Seok, & Suh, 2002)

Se puede observar en la figura 34 como la deformación no es uniforme en los bordes inferiores, en esta ubicación el material no tiene contacto con el dado, denominándose como zona muerta. Como no hay una reducción de espesor, este

problema puede solucionarse con la repetición del proceso volteando la lámina. Cuando se realiza la repetición del proceso, se puede obtener una estructura fibrosa como la obtenida en el proceso de laminado. Como la deformación plástica afecta la dureza de las láminas, se evaluó la dureza con respecto a la cantidad de pasadas realizadas en el proceso. En la figura 35 se pueden observar los resultados de este proceso (Lee, Seok, & Suh, 2002).

En los resultados, aparece el C2S2 como el proceso *dissimilar channel angular pressing* (DCAP) debido a que las bases del C2S2 proviene del DCAP.

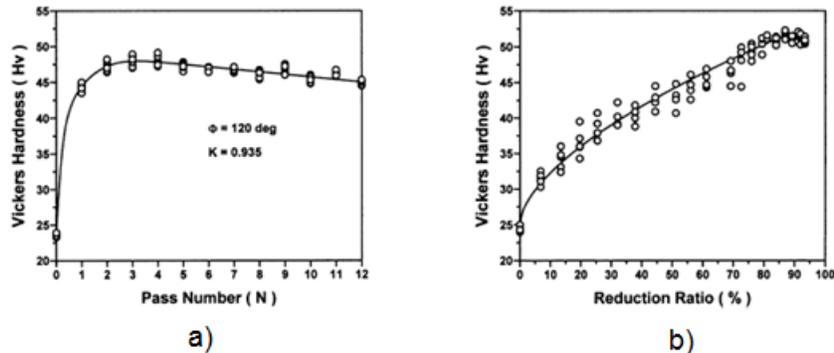


Figura 35. a) Variación de la dureza de las láminas 1050 Al con respecto a número de pasadas. b) Variación de la dureza de laminado en frio de las láminas 1050 Al medido en función de la tasa de reducción (R). (Lee, Seok, & Suh, 2002)

Como se puede observar de la figura 35a, hay un incremento de la dureza en la segunda pasada pero después hay una disminución gradual, lo cual indica la capacidad de controlar la cantidad de deformación para modificar las propiedades mecánicas del material. De la figura 34b, se pudo observar el aumento de la dureza hasta el 83% de reducción, pero después de eso no existe un cambio significativo en la dureza (Lee, Seok, & Suh, 2002).

Para poder comparar los datos entre los resultados obtenidos mediante el proceso de laminado en frio y el DCAP, se debe obtener con respecto a la deformación efectiva, ya que no es posible con la comparación directa debido a que los parámetros de ambos procesos difieren. La ecuación 1 es para obtener la deformación efectiva para ambos procesos (Lee, Seok, & Suh, 2002).

$$\varepsilon = \frac{2N}{\sqrt{3}} \cdot K^2 \cot\left(\frac{\Phi}{2}\right) \quad \varepsilon = \frac{2}{\sqrt{3}} |\ln(1-R)|$$

a) b)

Ecuación 1. Deformación efectiva a) DCAP b) laminado en frio.
(Lee, Seok, & Suh, 2002)

La deformación efectiva para el DCAP está expresado en términos de pasadas (N), la tasa de espesores (k), que se define como el espesor de entrada dividido el

espesor de salida y el ángulo oblicuo (ϕ) mientras la de laminación en frío esta expresado en término de la tasa de reducción (R) (Lee, Seok, & Suh, 2002).

En la figura 36 se puede observar que cuando la deformación efectiva del material se encuentra por debajo de 1.5, la dureza es superior para las muestras obtenidas en el DCAP, esto indica que la dureza se puede obtener en las etapas iniciales del DCAP, lo cual se encuentra en un rango de 3 a 4 pasadas por el DCAP con un dado de (ϕ)=120° y k=0.935. Para el caso de laminación, se puede deducir que la dureza aumenta con el incremento de la deformación efectiva, pero cuando alcanza su máxima dureza, la reducción del espesor es de un 83% (Lee, Seok, & Suh, 2002).

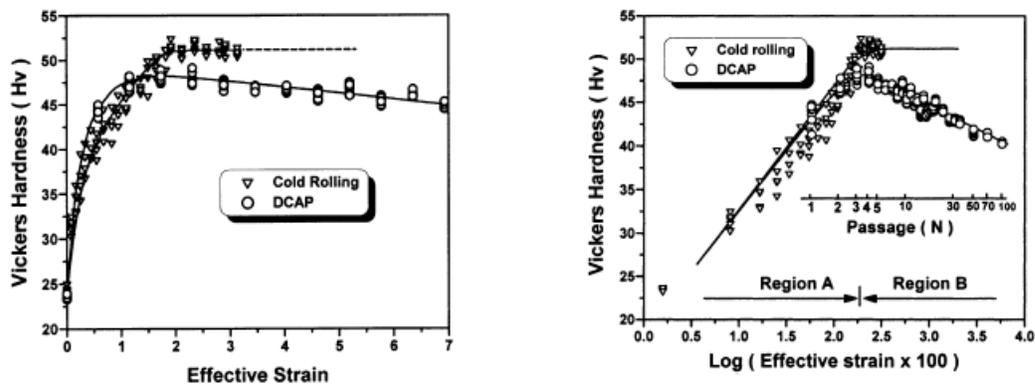


Figura 36. a) Variación de la dureza como función de la deformación efectiva inducido por el DCAP y laminación en frío. b) Variación de la dureza como función de la deformación efectiva. (Lee, Seok, & Suh, 2002)

En la tabla 13 se compara la efectividad del DCAP con respecto al proceso de laminación. Una de las ventajas más atractivas en el DCAP es que se mantienen las dimensiones del área transversal de la lámina (Lee, Seok, & Suh, 2002).

Tabla 13. Comparación de cantidad de esfuerzo entre laminación y el DCAP.

Rolling	57% (1.0)	77% (1.7)	83% (2.1)	90% (2.7)	94% (3.2)
DCAP	N = 1 (0.6)	N = 2 (1.2)	N = 3 (1.7)	N = 5 (2.9)	N = 50 (29.0)

2.5.13. Equal channel angular rolling (ECAR)

El mecanismo nació basado en la idea del ECAP, pero en vez de probetas en forma de barras rectangulares, se generaba deformación por cizallamiento de forma continua en las láminas. La lámina atraviesa los rodillos y obligan a la lámina a pasar por un canal con una inclinación oblicua. La medida que hay entre

los rodillos es la misma para los canales del molde que sirven para realizar la alimentación adecuadamente y para reducir la fuerza de fricción entre la lámina y el canal, el cual se lubrica con grafito. En este proceso los rodillos y el canal no son precalentados. En la figura 37 se ilustra el esquema del dispositivo ECAR (Chen, Cheng, & Xia, 2007).

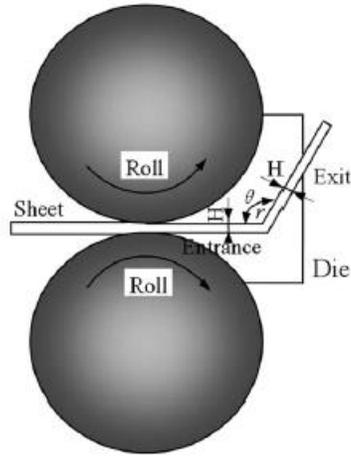


Figura 37. Esquema del dispositivo ECAR. (Chen, Cheng, & Xia, 2007).

La deformación por cizallamiento para este dispositivo varía mucho dependiendo del espaciamiento de los canales de los dados. Hay una mayor deformación mientras más ajustado sea el espesor de las láminas con respecto al espaciamiento entre los dados. Cuando la diferencia es muy grande, lo que genera es una deformación plástica por tracción y no una deformación por cizallamiento. En la figura 38 se puede apreciar como este parámetro puede afectar en la deformación de los granos dentro de las láminas de magnesio (Chen, Cheng, & Xia, 2007).

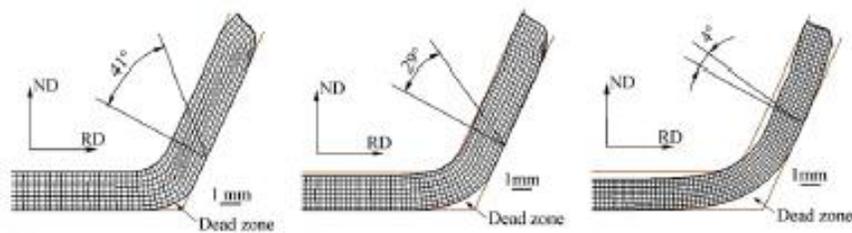


Figura 38. Deformación por cizallamiento en las láminas de magnesio en ECAR.

Chen et al analizó la conformabilidad de láminas de aleación de magnesio AZ31 a temperatura ambiente utilizando ECAR. Se utilizó una aleación de magnesio con dimensiones de 800 mm de largo, 120 mm de ancho y 1.9 mm de espesor. La lamina fue calentada a 623K por 3 min y procesado mediante ECAR utilizando los siguientes parámetros; ángulo oblicuo (θ) de 115° , radio oblicuo (r) de 2mm, altura del canal (H) 1.8 mm, apertura constante entre rodillos de 1.78 mm, y velocidad de alimentación de la lámina de 0.43 m/s. El canal y los rodillos no fueron precalentados y se lubricó el canal con grasa de grafito. Las láminas fueron sometidas a un solo pase de ECAR. Tanto la muestra procesada por ECAR,

muestra procesada, como el material en estado de entrega, muestra comercial, fueron recocidas a 573 K por una hora. (Chen, Cheng, & Xia, 2007).

De las muestras comercial y procesada se obtuvieron probetas circulares para el proceso de embutido a temperatura ambiente, para comparar la conformabilidad de las muestras. La velocidad del punzón fue de 5 mm/min y el lubricante utilizado fue olefin. En la tabla 14 se observan las dimensiones para la herramienta de conformado. (Chen, Cheng, & Xia, 2007)

Tabla 14. Dimensiones de la herramienta usado para la prueba de conformado. (Chen, Cheng, & Xia, 2007)

Diámetro punzón (mm)	30.0
Radio filete del punzón (mm)	8.0
Diámetro del dado (mm)	34.2
Radio filete del dado (mm)	6.0

De los resultados se pudo concluir que la muestra comercial tiene una razón de conformabilidad de 1.2, mientras que para las muestras de ECAR se obtiene una razón de conformabilidad de hasta 1.6 a temperatura ambiente. Esto quiere decir que el proceso ECAR permite aumentar la capacidad de deformación de las láminas analizadas, permitiendo obtener piezas más complejas, lo cual es debido al cambio de orientación de los cristales (Chen, Cheng, & Xia, 2007).

2.5.14. Half channel angular extrusion (HCAE)

Este proceso fue creado ya que en la mayoría de los dispositivos de deformación por cizallamiento, era necesario que el proceso se repitiera para poder obtener un refinamiento de grano significativo. El objetivo de este proceso era reducir la cantidad de repeticiones y obtener tamaños de granos finos. Este proceso integra el *equal channel angular extrusion* y un proceso de extrusión convencional para inducir una mayor cantidad de cizallamiento con pocas repeticiones en las piezas. Este proceso tiene un dado que tiene un ancho de entrada y salida diferente. Donde el ancho de entrada se reduce a la mitad en la salida. El dado tiene una intersección en el interior donde el ángulo interno es denominada ϕ y el exterior ψ . Para una segunda repetición, se toman 2 piezas obtenidas de la procesada para combinar en una sola (Kyungjin & Jonghun, 2013). Ver figura 39 para el diagrama del proceso HCAE.

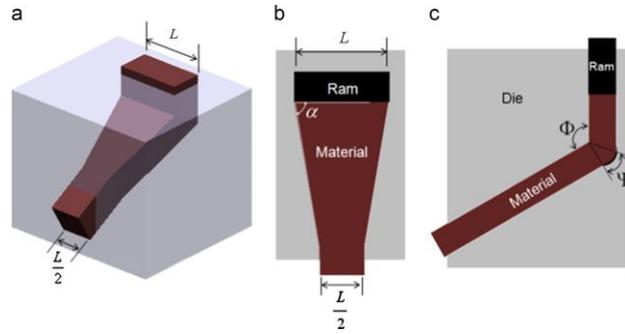


Figura 39. Diagrama del proceso HCAE: a) Isométrico, b) superior, c) lateral (Kyungjin & Jonghun, 2013)

Para la investigación, se implementó un dado con $\phi=90^\circ$, $\psi=10^\circ$ y $\alpha=45^\circ$ y se usaron piezas de $25 \times 50 \times 60 \text{ mm}^3$ de aleación de magnesio AZ61. Los dados son diseñados de tal manera para que no induzcan fallas durante el proceso. Los dados, como las piezas, son precalentados a la misma temperatura. La velocidad de extrusión del proceso se realizó a 5 mm/s y para disminuir la fricción se lubrica la pieza y el émbolo con grafito.

La figura 40 muestra la imagen obtenida por *orientation imaging microscopy* (OIM). En la muestra inicial, figura 40a, se puede observar que los granos no están distribuidos uniformemente y los tamaños varían entre $5 \mu\text{m}$ y $50 \mu\text{m}$, un tamaño promedio de grano de $21.05 \mu\text{m}$. Las muestras obtenidas después del proceso indican que la microestructura puede mejorar drásticamente. A una temperatura de 523 K , se pudieron obtener tamaño de granos promedio de $5.4 \mu\text{m}$, una reducción de grano de 74% y a una temperatura de 573 K se obtuvo tamaño de grano de $7.3 \mu\text{m}$, lo que indica una reducción de grano de 66% . Aunque se pudieron refinar los granos después del proceso, estos no están distribuidos uniformemente. Similarmente a los resultados obtenidos de los otros procesos, a una temperatura baja se puede obtener granos más finos. Esto se debe a la recristalización dinámica que se presenta en procesos de trabajo en caliente y este fenómeno tiene una influencia muy grande en el refinamiento de grano y propiedades mecánicas de las aleaciones de magnesio. (Kyungjin & Jonghun, 2013).

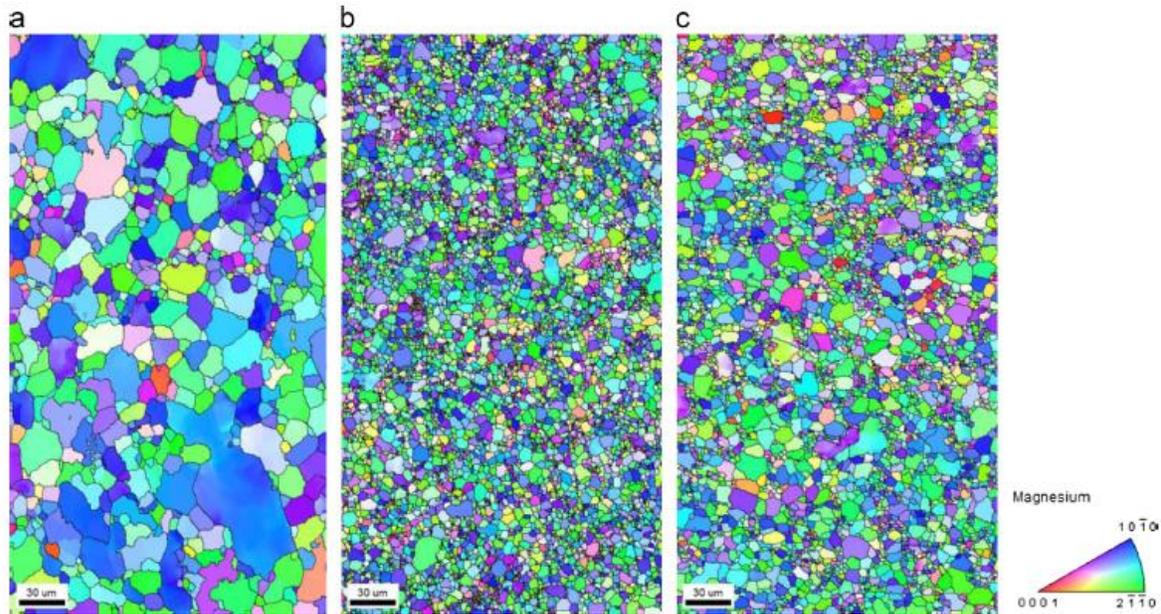


Figura 40. Microestructura en el proceso HCAE: a) inicial sin procesar, b) 523K y c) 573K (Kyungjin & Jonghun, 2013)

2.6. RECOLECCIÓN DE DATOS CUALITATIVOS Y CUANTITATIVOS USADOS COMO CRITERIO PARA EL DISEÑO

Datos Cualitativos

- Control de la temperatura de deformación
El dispositivo se compondrá en 2 partes. El primer segmento lo conformará el horno, como hay una gran variedad de hornos en el mercado, no se diseñara y se elegirá uno comercial. Se desea que el horno sea de tipo continuo para facilitar el proceso de alimentación de las láminas. El segundo segmento será el dispositivo que realiza la deformación por cizallamiento.
- Proceso de laminación
Como se quiere implementar el dispositivo en procesos industriales, se desea que la alimentación de las láminas sea de forma continua para obtener propiedades mejoradas en las láminas de forma rápida.
- Textura
Según la investigación realizada, se pudo comprobar que existen muchas variaciones de mecanismos que generan deformación por cizallamiento. De los resultados obtenidos por parte de cada uno de los mecanismos se pudo observar que la textura juega un papel muy importante en las

propiedades del material. Se concluyó que se quieren obtener granos finos de forma más homogénea posible para el desempeño del material.

- **Mantenimiento**
Se busca que todas las piezas que conforman el dispositivo sean fáciles de reemplazar y su mantenimiento sea lo menos simple posible.
- **Ubicación**
El dispositivo estará ubicado en un espacio cerrado, con poca humedad y con un ambiente libre de polvo.
- Se debe tener en cuenta que mientras más repeticiones se realice por el proceso de cizallamiento, mayor es la reducción de los granos. Se debe tener en cuenta que las repeticiones no son la única forma de obtener granos finos. Existen parámetros dentro del mecanismo que ayudan con el proceso de refinar los granos. Estos parámetros son; la temperatura y el ángulo de cizallamiento.

Datos Cuantitativos

- **Dimensión**
Como el dispositivo se va a construir con fines experimentales, para poder estudiar la estructura en función de la temperatura, velocidad, fricción y el ángulo de cizallamiento, se construirá un prototipo con una escala reducida. La mínima dimensión de la boquilla del horno y del sistema de alimentación al mecanismo de cizallamiento se determinará por el tamaño de las láminas (probetas), según las normas ASTM, se requiere que las probetas tengan una longitud de 100mm. Como se requiere generar cizallamiento en ambas direcciones, longitudinal y transversal, se deberá poder alimentar para láminas de 100*100 mm, y para garantizar la calidad de los bordes de las probetas, se suman 20 mm, es decir que el ancho debe ser de 120 mm.
- **Temperatura**
El rango de temperatura que debe poder controlar el horno es entre 25 y 450°C.
- **Velocidad de laminación**
De la consulta realizada de los dispositivos de laminación, la velocidad apropiada para la generación de deformación por cizallamiento se encuentra en un rango de 5-50m/min.

2.7. DEFINICION DE LA SOLUCIÓN AL PROBLEMA

Teniendo en cuenta los dispositivos existentes para la generación de deformación de cizallamiento en las láminas de magnesio, se debe de definir algunas restricciones y parámetros para desarrollar un dispositivo que cumpla las expectativas propuestas.

Dentro de la gran cantidad de dispositivos existentes, se desea enfatizar en aquellas que tengan la posibilidad de una implementación directa a un proceso actual, es decir, sin la necesidad de una modificación extrema de una línea de producción, ya que se busca que en un futuro, se pueda implementar la tecnología directamente al proceso.

Dentro de los equipos consultados, el más atractivo es el equal channel angular Rolling (ECAR). La ventaja de este mecanismo es que su diseño es simple y la generación de cizallamiento en las láminas es continua, por esta razón, se toma como base el diseño de este dispositivo.

Como no hay información detallada de los parámetros para el funcionamiento de la máquina, existe el temor que con el diseño del ECAR, la lámina no atraviese de forma satisfactoria por los dados, ya que a mayor área superficial entre el dado y la lámina, mayor será la probabilidad de que se detenga en medio camino. Por esta razón se desea implementar otro par de rodillos en el extremo de salida para garantizar que atraviese por los canales, ver Figura 41

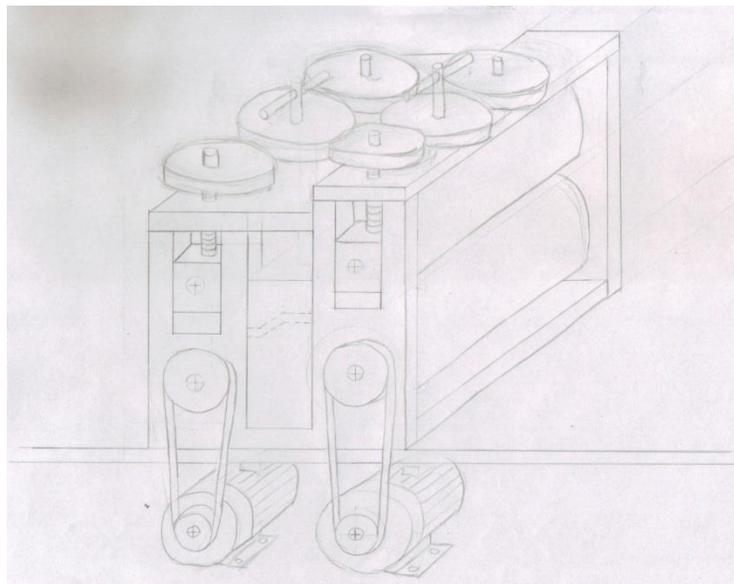


Figura 41. Diseño Preliminar de la laminadora de cizallamiento.

3. DISEÑO BÁSICO

Este capítulo se dividirá en varias secciones según los pasos que conforman el diseño, la primera etapa consiste en dividir el problema en subsistemas funcionales con el fin de lograr un análisis más detallado de cada componente, en la segunda etapa se realizara el diagrama de bloques, la tercera etapa consiste en los criterios de selección donde se realiza una selección preliminar de los distintos equipos y elementos que conforman el dispositivo dando a conocer las ventajas y desventajas de cada componente con la finalidad de elegir el más apropiado y la etapa final dentro del diseño básico consiste en la integración de los subsistemas con los elementos que fueron obtenidos en la etapa anterior (prototipo).

3.1. DEFINICIÓN DE SUBSISTEMAS

Subsistema bastidor: El objetivo de este subsistema es proteger y contener a los elementos que componen la máquina. Este subsistema contendrá el resto de subsistemas que compondrá la máquina y por esta razón se debe de conocer con detalle como cada componente será acoplado para garantizar la seguridad y obtener una estructura rígida.

Este subsistema tiene varios objetivos, el primer objetivo es que este componente debe de soportar todas las cargas de los otros subsistemas, el segundo objetivo es de proteger los elementos de la maquina contra agentes que perjudiquen el funcionamiento de la máquina, aunque este segundo depende mucho del ambiente de trabajo.

Subsistema motor: es el subsistema más importante dentro de una máquina. Este elemento es el encargado de transformar algún tipo de energía (sea eléctrica, hidrocarburos,, química, térmica, etc. en energía mecánica para poder realizar el trabajo necesario de la máquina.

Subsistema de transmisión de potencia: subsistema fundamental dentro de los elementos de una maquina con aplicaciones mecánicos, se encarga de transmitir la potencia entre elementos para la operación del equipo.

Subsistema de laminación: Este subsistema es el encargado de realizar la alimentación de las láminas de magnesio desde el momento que sale del horno hasta el dispositivo de generación de cizalladura. Es de suma importancia ejercer la adecuada fuerza de compresión que ejercen los rodillos para no generar ninguna reducción en el espesor de las láminas.

Subsistema de dispositivo de cizallamiento: es el elemento que se encarga de generar deformación por cizallamiento en las aleaciones de magnesio. Este dispositivo tendrá la capacidad de variar el ángulo de los canales para poder

estudiar y analizar la microestructura de las láminas según las modificaciones de proceso realizadas.

3.2. DIAGRAMA DE BLOQUES

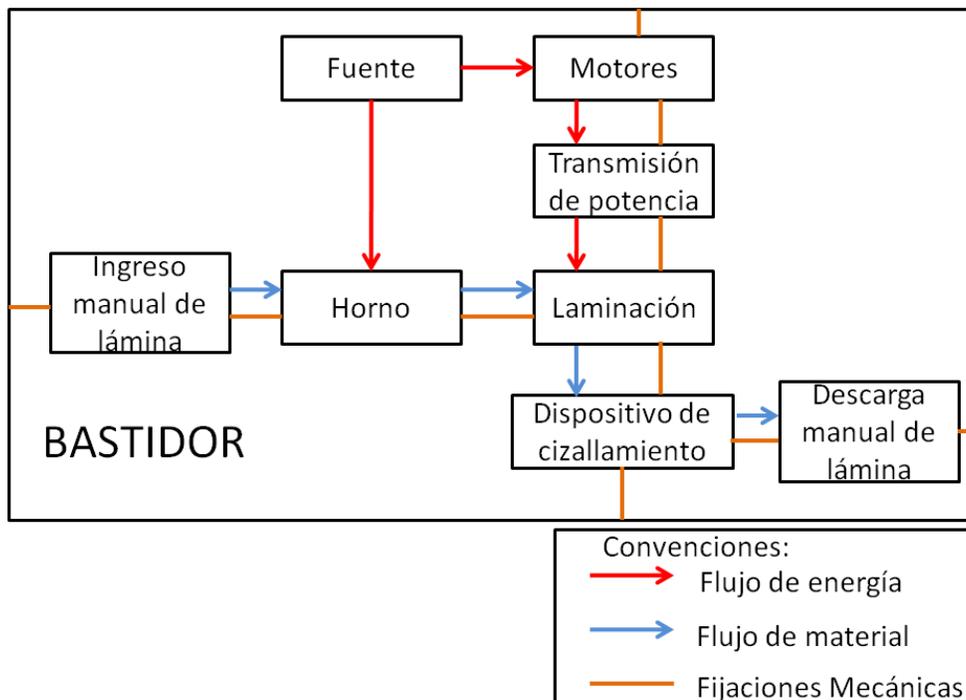


Figura 42. Diagrama de bloques

En base al esquema que se presenta anteriormente, figura 42, se puede realizar la siguiente interpretación. Partiendo del orden que se le dio a cada uno de los subsistemas, el proceso que se desea realizar para el dispositivo de laminación y de control sobre dicho proceso, sistemas de seguridad y alimentación de la máquina, se debe tener presente un orden lógico que constituya un proceso esquemático y explicativo del proceso que se tiene, además de las variables que interviene dentro de este.

Inicialmente se tiene el bastidor, subsistema que actúa como soporte de los demás subsistemas. Dentro del esquema se puede apreciar que el bastidor es el marco donde se encuentran contenidos todos los elementos que componen el dispositivo.

Inicialmente la fuente de energía alimenta el motor, el horno y los sistemas de control. El motor convierte la energía eléctrica a mecánica para generar la potencia necesaria para realizar el proceso de laminación y cizallamiento, lo cual es el proceso más crítico dentro del sistema. Para poder transmitir la potencia requerida del dispositivo de cizallamiento, se debe implementar el subsistema de transmisión de potencia desde el motor.

El proceso donde debe circular las láminas es el siguiente: inicialmente se alimenta o se ingresa las láminas de forma manual por un operador, estas laminas fluyen debido a las bandas transportadoras e ingresan al horno donde se deben calentar a una temperatura determinada, cuando las láminas salen por el otro extremo del horno, ingresan al subsistema laminación y cizalladura, que son elementos que sirven para generar la deformación por cizalladura en las láminas, y por último el operador debe de descargar manualmente el producto.

3.3. CRITERIOS DE SELECCIÓN

Para cada uno de los subsistemas se realiza un estudio del grupo de alternativas que pueden satisfacer la operación, estas opciones son evaluadas para facilitar el proceso de selección de la más adecuada, tomando como referencia las consideraciones de diseño. Se asume una evaluación con puntajes de 0 a 10, donde el valor de diez (10), indica que cumple exactamente con el requisito, es ideal para la operación. Por su parte, cero (0), el más bajo, plantea que el requisito no se satisface en sus mínimas exigencias.

Los criterios a evaluar para la selección de cada uno de los elementos que conforman el dispositivo de laminación que realice deformación por cizallamiento en láminas de aleaciones de magnesio AZ31 o AZ91 son los siguientes: Disponibilidad, Costo, Confiabilidad, Mantenimiento y Seguridad.

3.3.1. Disponibilidad

Este criterio asegura la continuidad operacional de un elemento en un tiempo dado. Se referirán a los elementos que tengan fácil acceso y que en caso de que el elemento falle los repuestos sean de fácil consecución o que las partes sean modificables en la cual no se altere el objetivo de la máquina.

3.3.2. Costo

El costo es la inversión económica que representa la fabricación de un producto, o simplemente la prestación de un servicio. Se debe aclarar que para este criterio está incluida la rentabilidad de los elementos, es decir que se tienen en cuenta la eficiencia y eficacia durante el periodo de su vida útil.

3.3.3. Confiabilidad

Es el parámetro que indica de que la maquina funcione adecuadamente bajo las condiciones establecidas y sea llevada a cabo de manera exitosa sin la presencia de incidentes. Busca determinar la posibilidad de un trabajo continuo con buena calidad.

3.3.4. Mantenimiento

En este criterio se referirá a la facilidad de las acciones y estrategias que se deben prestar para que el mecanismo se mantenga en buen estado y tenga un buen funcionamiento. Es importante tener en cuenta a la hora de la puntuación de los elementos para este criterio que entre menos mantenimiento o acciones se deba realizar, su puntuación será mayor.

3.3.5. Seguridad

Se refiere como la ausencia de riesgo tanto en los subsistemas adyacentes como en los operarios para que ambos estén en óptimas condiciones de seguridad y que no hayan lesiones o daños.

3.4. PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN DE SUBSISTEMAS

En esta sección se realizara un estudio de cada subsistema y las diferentes alternativas para realizar los criterios de selección para elegir el más adecuado.

3.4.1. Subsistema Bastidor

Opción 1: Fundición gris: Se propone realizar el bastidor por fundición, consta de la formación de un molde con la figura del bastidor y hacer un vaciado de metal fundido en él para obtener dicho elemento. Esta opción es ventajosa por su alta resistencia y rigidez, pero presenta un alto costo relativo y dificultades para su reparación.

Opción 2: Perfiles soldados con láminas de acero al carbón: Realizar el bastidor por medio de perfiles de láminas de acero con que posteriormente son unidas mediante soldadura. Este método es de bajo costo y buena resistencia, sin embargo, presentan la dificultad de reparación de sus piezas. Los aceros al carbón se emplean generalmente para la fabricación de piezas, órganos o elementos de máquinas; en ellos son fundamentales ciertas propiedades de orden mecánico, como la resistencia a la tracción, tenacidad, resistencia a la fatiga y alargamiento.

Opción 3: Perfiles pernados con láminas de acero al carbón: Los perfiles pernados, manejan un concepto similar a los perfiles soldados, sin embargo la unión de las piezas consiste en la implementación de pernos específicos, para esta aplicación cada una de las láminas tendrá los agujeros y puntos de unión requeridos.

Opción 4: Fundición gris y perfiles mixtos de láminas de acero al carbón: Consiste en realizar el bastidor por medio de perfiles soldados y pernados, de las partes que no sean significativamente afectadas por las vibraciones, y otra parte a partir de una fundición gris, que sirva como amortiguador de cualquier tipo de

vibraciones, capaz de garantizar mayor rigidez y resistencia. Presenta las ventajas y desventajas de las juntas ya antes mencionadas.

Tabla 15. Cuadro de selección para el bastidor

	DISPONIBILIDAD	COSTO	CONFIABILIDAD	MTTO	SEGURIDAD	TOTAL
Peso	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	1
Fundición gris	8	7	7	10	8	8.4
Perfiles soldados con láminas de acero al carbón	9	6	7	8	8	7.5
Perfiles pernadas con láminas de acero al carbón	4	7	7	7	5	6.5
Fundición gris y perfiles mixtos de láminas de acero al carbón	8	8	9	9	8	8.6

Según la tabla 15, se va a fabricar el bastidor utilizando fundición gris y perfiles mixtos de láminas de acero al carbón, es una buena alternativa debido a que tiene una buena rigidez y resistencia, además tiene una mayor facilidad para cambios de pieza.

3.4.2. Subsistema Motores

Opción 1: Motores síncronos: Son motores de velocidad rigurosamente constante con la frecuencia de la red. Los polos del motor siguen el campo giratorio impuesto al estator por la red de alimentación (Lobosco & Da Costa Dias, 1989).

Ventajas

- El rendimiento del motor síncrono es mayor que el del motor de inducción equivalente, particularmente a baja velocidad angular.
- Los motores síncronos pueden trabajar con factor de potencia capacitivo o unitario.
- La velocidad angular es rigurosamente constante con la frecuencia de alimentación.

Desventajas

Uno de los problemas del motor síncrono es su arranque. Se utilizan tres métodos:

- Motor auxiliar: generalmente un motor de inducción de anillos; este método es empleado para el arranque de grandes motores síncronos.
- Conversor de frecuencia: en este método el motor arranca sincrónicamente a una frecuencia variable y creciente, proporcionada por un conversor electrónico.
- Arranque asíncrono a través de la jaula de amortiguamiento, construida en ranuras de las piezas polares.

Opción 2: Motores asíncronos.

Los motores asíncronos o de inducción, por ser robustos y baratos, son los más extensamente empleados en la industria.

Opción 3: Motores de corriente continua.

Son motores de velocidad ajustable, que el advenimiento de los convertidores tiristorizados (rectificadores de tensión controlada).

Ventajas

- La flexibilidad que se puede obtener de los motores de corriente continúa con sus varios tipos de excitación, asociada a la relativa simplicidad de los modernos convertidores de corriente continua.

Desventaja

- Para una misma potencia, los motores de corriente continua son mayores y más caros que los motores de inducción.
- Debido a la presencia del colector existe una mayor necesidad de mantenimiento.
- La conmutación de corriente por un elemento mecánico implica arcos y chispas, un impedimento decisivo si el motor debe ser aplicado en ambientes peligrosos (Lobosco & Da Costa Dias, 1989).

Tabla 16. Cuadro de selección para el sistema motriz

	DISPONIBILIDAD	COSTO	CONFIABILIDAD	MTTO	SEGURIDAD	TOTAL
Peso	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	1
Motores síncronos	7	7	7	6	8	6.7
Motores asíncronos	9	9	5	8	8	7.7
Motores de corriente continua	4	3	9	3	3	4.3

Según la tabla 16, se optó por los motores asíncronos ya que son los motores apropiados debido a su amplio mercado. Por su robustez, estos elementos requieren de poco mantenimiento lo cual a largo plazo son más atractivos que los otros tipos de motores.

3.4.3. Subsistema transmisión de potencia

Opción 1: Cadenas y Sprockets. Las cadenas tienen la ventaja de transmitir la potencia sin la preocupación de deslizarse como lo haría con las bandas. Una cadena está constituida por: chapetas, pines o pasadores, rodillos, bujes y espigas. Como elemento de impulsión, se emplea el sprocket (una rueda de dientes). Estos elementos se utilizan cuando se requieren transmitir altos torques a bajas

velocidades. Como estos elementos tiene un desgaste constante debido a la vibración y ruido entre elementos, el mantenimiento debe ser constante (lubricación).

Opción 2: Bandas y Poleas. Consiste en una transmisión de potencia por medio de elementos circulares, unidos mediante una correa. Comercialmente las bandas más comunes que se pueden encontrar dentro del mercado son: bandas en V, planas, cruzadas, y dentadas. Las bandas de uso industrial son fabricadas principalmente de polímeros flexibles con refuerzos de nylon o acero para dar resistencia a la tensión. Sus principales características funcionales se resumen considerando sus ventajas de diseño, donde se destacan: la posibilidad de grandes distancias entre centros, una relación de alta velocidad fija en función del diámetro, bajo torque y un bajo costo relativo.

Opción 3: Engranajes. La transmisión de potencia por medio de engranajes, consta de dos o más elementos circulares con muescas unidos entre sí. Existen diferentes tipos de engranajes según la forma del diente y del cuerpo del engranaje mismo. Cada uno de estos elementos tiene algún tipo de ventaja relativa que le da un uso específico. Los trenes se utilizan para transmitir altas potencias en distancias cortas o para permitir la selección de una relación de transmisión mediante la combinación de dos o más engranes. La transmisión de potencia por engranajes trae grandes ventajas: Amplio rango de torques y velocidades, y sus altas relaciones de velocidad, sin embargo, su fabricación es costosa, y requieren lubricación.

Tabla 17. Cuadro de selección de transmisión de potencia.

	DISPONIBILIDAD	COSTO	CONFIABILIDAD	MTTO	SEGURIDAD	TOTAL
Peso	0.1	0.1	0.3	0.4	0.1	1
Cadenas y Sprockets	9	9	6	8	8	7.6
Bandas y Poleas	9	6	8	7	8	7.5
Engranajes	4	9	9	4	3	5.9

De la tabla 17, se decidió utilizar principalmente cadenas y sprockets debido a la potencia que se va a requerir para generar deformaciones por cizallamiento, se deben transmitir potencias relativamente bajas. Como la máquina se debe trabajar en un rango amplio de velocidades y torque para la laminación de las láminas de aleación de magnesio, se implementara variador de frecuencia. Cuando se trabajan a altas velocidades y bajos torques, las bandas serian la opción ideal.

3.4.4. Subsistema alimentación de material

Opción 1: Ingreso de la lámina sin guía. La alimentación de las láminas se realizará de forma manual por el operario, como no posee ninguna guía es posible generar deformaciones de cizalladura en ubicaciones no deseados. Las ventajas que ofrece esta alternativa son las consideraciones adicionales en el diseño y tampoco requiere de mantenimiento adicional en el bastidor debido a las guías.

Opción 2: Alimentación de la lámina con guías. La lámina es introducida de forma manual por el operario apoyándose en unas guías. La ventaja es que garantiza que las láminas ingresen de la manera que el operario desea. Las desventajas se encuentra en el diseño y el mantenimiento adicional requerida por el diseñador.

Tabla 18. Cuadro de selección para la alimentación de material.

	DISPONIBILIDAD	COSTO	CONFIABILIDAD	MTTO	SEGURIDAD	TOTAL
Peso	0.1	0.2	0.4	0.2	0.1	1
Ingreso de la lámina sin guía	10	8	4	9	7	7.5
Ingreso de la lámina con guía	8	6	8	7	9	7.7

Según el cuadro de selección, tabla 18, la mejor alternativa para la alimentación de las láminas es colocar unas guías para poder realizar la alimentación adecuadamente.

3.4.5. Subsistema laminación y cizallamiento.

Opción 1: Rodillos verticales con dados (ECAR): Este proceso es igual al ECAR donde la lámina de aleación de magnesio pasa por unos rodillos donde este obliga a atravesar por un canal y genera la deformación por cizallamiento en las láminas. Las desventajas que se deben considerar en este mecanismo son; 1) Se debe de implementar varios dados con diferentes ángulos para el procesamiento de las láminas. 2) El diseño del mecanismo fue realizado para trabajar a temperatura ambiente, se debe calentar los dados para que no haya choque térmico e impedir fisuras en las láminas. 3) La potencia que se requiere para garantizar que las láminas atraviesen los canales 4) Cuando la lámina se encuentra en el extremo, no hay fuerza que realice el empuje para que las láminas atraviesen los dados. Teniendo en cuenta estos criterios, se obtuvo la siguiente opción.

Opción 2: Rodillos de alimentación y extracción tipo ECAR: Este sistema es similar al ECAR, en este mecanismo se desea implementar rodillos de alimentación y de extracción para que cuando la lámina salga por los rodillos de alimentación, los rodillos de extracción termine realizando el trabajo restante, como se puede observar en la figura 43. El canal de cizallamiento puede ser de tipo macizo o mediante láminas (soldado entre láminas ya que si son pernados,

los esfuerzos generados pueden fracturar los pernos). Las desventajas que se deben considerar son; 1) Se deben colocar elementos de calentamiento en los dados para evitar el choque térmico. 2) La potencia que se requiere debe ser menor que del caso del ECAR pero no garantiza que pase por el canal 3) La complejidad en el diseño debido a las consideraciones que se deben tener para el cambio de los ángulos de los dados. Una solución para este problema sería colocar el rodillo de extracción a una altura fija y cambiar el ángulo de los dados. En la figura 43a se puede observar que el ángulo de cizallamiento es mayor que en la del 43b.

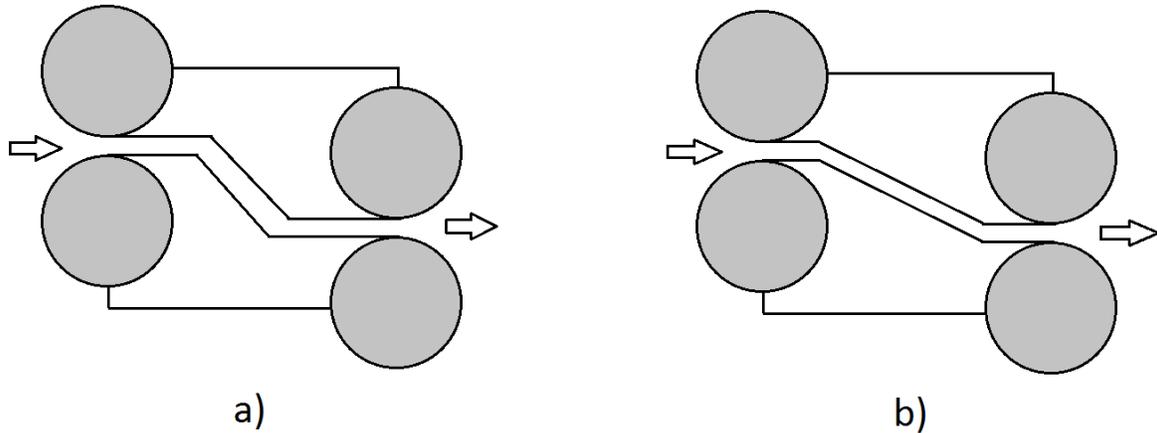


Figura 43. Mecanismo con rodillos de alimentación y extracción tipo ECAR.

Opción 3: Rodillos de alimentación y extracción tipo C2S2: Este sistema es similar al anterior. La configuración de los rodillos es la misma pero la diferencia se encuentra en los dados. A diferencia de la anterior, la lámina sigue por el recorrido de los rodillos hasta encontrarse con el dado inferior. Este dispositivo funciona como una extrusora, cuando la lámina pasa por los dados existe una reducción en el espesor, pero cuando pasa por la zona de deformación por cizallamiento vuelve a aumentar el espesor, por esta característica es posible realizar repeticiones en este dispositivo. Ver el esquema del mecanismo en la figura 44.

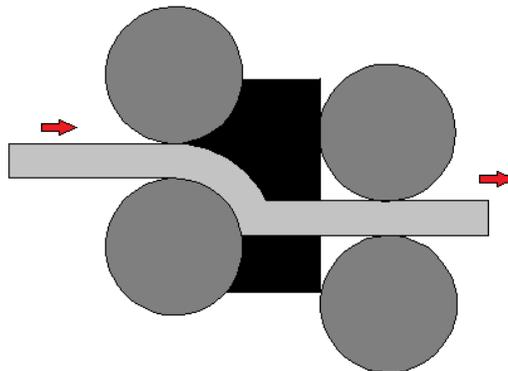


Figura 44. Mecanismo con rodillos de alimentación y extracción tipo C2S2

Opción 4: Sistema de laminación doble con punzón: Este mecanismo fue desarrollado para simplificar las variables que se presentan en los diseños anteriores. Este diseño tiene la ventaja de tener las dos etapas de laminación a la misma altura y cada uno se puede mover verticalmente de forma independiente. Otra gran diferencia en el mecanismo es la implementación de un punzón, este tiene la tarea de generar cizallamiento en las láminas. La ventaja del punzón es la capacidad de modificar el ángulo de deformación de cizallamiento moviéndolo verticalmente. Ver figura 45.

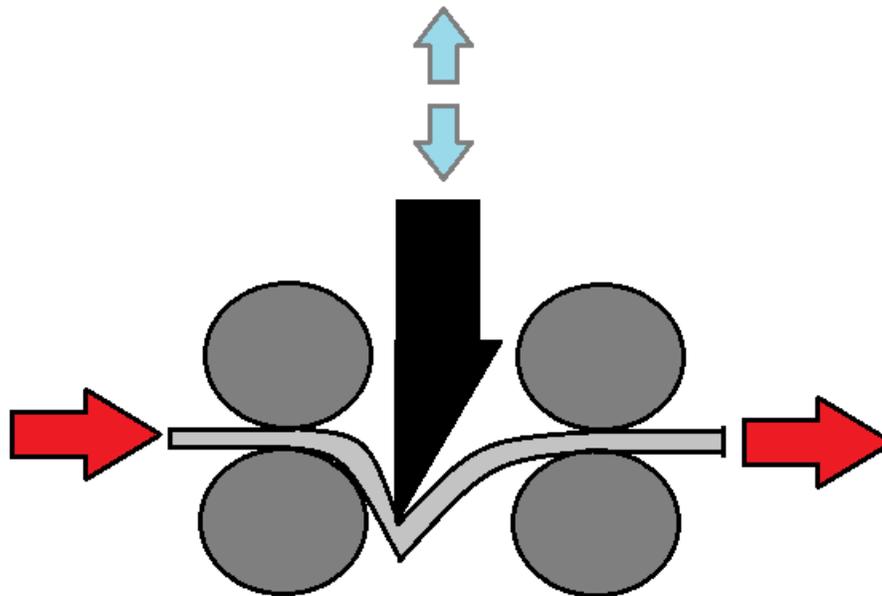


Figura 45. Sistema de laminación doble con punzón.

Tabla 19. Cuadro de selección de laminación y cizallamiento.

	DISPONIBILIDAD	COSTO	CONFIABILIDAD	MTTO	SEGURIDAD	TOTAL
Peso	0.1	0.2	0.3	0.3	0.1	1.0
Rodillos verticales con dados	8	9	5	7	8	7.0
Rodillos de alimentación y extracción tipo ECAR	7	8	8	7	8	7.6
Rodillos de alimentación y extracción tipo C252	7	9	7	7	7	7.2
Sistema de laminación doble con punzón	8	7	9	7	8	7.8

Uno de los criterios más importantes para definir el mecanismo era si dicho mecanismo era capaz de realizar la deformación por cizallamiento. El mecanismo que se selecciono tiene una gran ventaja ya que la mayoría de los parámetros son variables y el usuario puede configurar de forma para que garantice el

funcionamiento. Este mecanismo se puede configurar para que funcione como el sistema ECAR retirando el rodillos de del extremo de la salida de la lámina y en vez del punzón, se adapta el dado con el canal.

3.4.6. Desplazamiento vertical

Para poder alimentar los diferentes calibres de las láminas, se debe poder controlar el desplazamiento vertical del rodillo superior de la laminadora.

Opción 1: Tornillo sin fin con rueda dentada: Se colocara en la parte superior del bastidor un tornillo sin fin que estará conectado mediante dos ruedas dentadas. Cada rueda dentada mediante su eje estará acoplada al rodillo. El desplazamiento se efectuara de manera manual. La desventaja es la falta de precisión que ofrece este sistema.

Opción 2: Actuador lineal: Este dispositivo ofrece una mejor precisión y larga durabilidad. La desventaja es que se debe implementar un sensor adicional para conocer el desplazamiento del actuador lineal y este resultaría en un aumento en el costo de la máquina.

Opción 3: Servomotores: Se implementa un servomotor con codificador óptico absoluto en el extremo del rodillo, acoplado al tornillos sin fin para controlar el desplazamiento. La desventaja de esta alternativa es el mantenimiento que se requiere para ambos mecanismos.

Tabla 20. Cuadro de selección para desplazamiento vertical del rodillo.

	DISPONIBILIDAD	COSTO	CONFIABILIDAD	MTTO	SEGURIDAD	TOTAL
Peso	0.2	0.2	0.3	0.2	0.1	1
Tornillos sin fin con rueda dentada	9	9	8	8	8	8.3
Actuador lineal	7	7	9	8	9	8.2
Servomotores	8	7	9	7	9	8.1

De la tabla 20 se puede observar que uno de los factores más influyentes para haber seleccionado los tornillos sin fin con rueda dentada era su simplicidad. A pesar de que no es un instrumento muy preciso, ya que el movimiento vertical es manual, el costo, disponibilidad y mantenimiento lo convierte en un dispositivo deseado.

3.4.7. Material rodillos

En esta sección se definirá el material apropiado para la fabricación de los rodillos, una de las variables más importantes en consideración es la temperatura de operación, lo cual oscila entre la temperatura del medio ambiente hasta la

temperatura de recristalización de las láminas de magnesio (aproximadamente 450°C). Para la selección de los rodillos se investigó la norma ISO 9001:2000

Opción 1: Acero 1045 recocido: Se clasifica entre el grupo de aceros puros al carbón. Son comúnmente utilizados para la fabricación de ejes y engranajes. Este material es empleado para la fabricación de herramientas forjadas de todo tipo. Para esta alternativa la temperatura de operación es de 670-710°C.

Opción 3: Acero 4140 temple: Es un acero aleado al Cr-Mo. Es comúnmente utilizado para nitrurado, tornillos de alta resistencia, etc. Tiene buenas características de estabilidad en caliente hasta 400°C sin fragilidad de revenido, muy versátil y apto para esfuerzos de fatiga y torsión. Su temperatura de operación es de 830-850°C.

Opción 2: Acero 4340 temple: Se clasifica en el grupo de acero con níquel, cromo y molibdeno. Es comúnmente utilizado para la fabricación de engranes, ejes y otras piezas que requieren de un buen endurecimiento directo. Este material es reconocido por su dureza y por su capacidad de obtener alta resistencia bajo el tratamiento térmico, manteniendo siempre una buena resistencia a la fatiga. Su temperatura de operación es de 820-860°C.

Tabla 21. Cuadro de selección para el material de los rodillos.

	DISPONIBILIDAD	COSTO	CONFIABILIDAD	MTTO	SEGURIDAD	TOTAL
Peso	0.1	0.1	0.3	0.4	0.1	1
Acero 1045 recocido	8	8	9	8	8	8.3
Acero 4140 Temple	7	7	8	8	8	7.8
Acero 4340 Temple	7	6	8	8	8	7.7

De la tabla 21, se puede observar que se el material a emplear en el dispositivo es un acero 1045 recocido ya que la temperatura de trabajo de la maquina es relativamente baja y no es necesario emplear un material más resistente.

Para el calentamiento de los rodillos, para que no genere choque térmico, se calentaran anteriormente con una resistencia tubular. Estas resistencias se colocaran manualmente hasta llegar a la temperatura deseada y en el momento de la laminación de la lámina, se retiran.

3.4.8. Subsistema de descarga de material

Opción 1: Descarga manual. El operario es el encargado de extraer mediante unas pinzas las láminas obtenidas en el proceso de cizallamiento. Su ventaja se encuentra en el diseño y el mantenimiento. Una de las desventajas se encuentra principalmente en las posibilidades de cometer errores debido al factor humano.

Opción 2: Bandeja de descarga. Al final del proceso, se coloca una bandeja de descarga para enfriar las láminas y después ser descargado por el operario manualmente sin la necesidad de instrumentos adicionales. La ventaja es la seguridad del operario. La desventaja es el diseño adicional y el mantenimiento.

Tabla 22. Cuadro de selección para el descarga del material.

	DISPONIBILIDAD	COSTO	CONFIABILIDAD	MTTO	SEGURIDAD	TOTAL
PESO	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	1
Descarga manual	10	10	8	10	8	9.3
Bandeja de descarga	9	8	9	9	10	9.1

Se puede observar de la tabla 22 que la ventaja de la descarga manual es debido a su diseño y mantenimiento y estos lo convierte en un sistema más sencillo ya que no se requiere la una integración adicional al mecanismo. El criterio de seguridad no es un factor importante ya que la lámina se puede ir colocando en la mesa de trabajo donde está la maquina laminadora.

3.5. INTEGRACIÓN DE LOS SUBSISTEMAS

Una vez que se hayan seleccionado los componentes que componen el mecanismo del dispositivo de laminación por cizalladura por medio de los criterios de selección, se procede a realizar la integración de los elementos. En esta etapa se debe estudiar la compatibilidad entre cada uno de los elementos que lo componen para su buena funcionalidad. En la figura 46 se puede observar la integración de los subsistemas que se han optado.

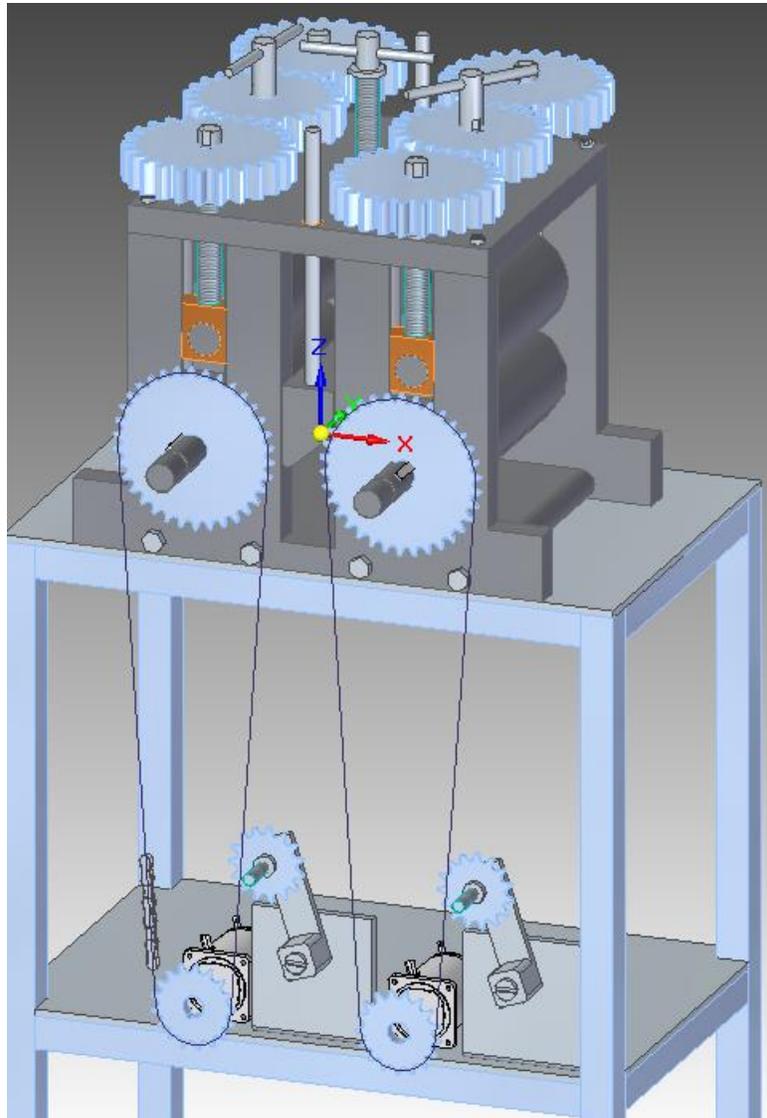


Figura 46. Integración de los subsistemas

La máquina está compuesta básicamente por 2 laminadoras y entre las laminadoras se coloca una especie de punzón. Este prototipo no estará diseñado para una alimentación continua ya que inicialmente la lámina debe de estar sujetadas por las dos laminadoras y mediante la ayuda de un punzón, se debe de generar deformación por cizallamiento en la lámina de magnesio. La distancia vertical del punzón define el ángulo de deformación de la lámina. Para el funcionamiento de la máquina, se deberá colocar las resistencias tubulares en los rodillos y en el punzón hasta que alcance la temperatura de trabajo. Una vez alcanzado la temperatura, se retira la resistencia tubular y procede a ingresar la lámina hasta que alcance el extremo de salida. Cuando se sujete ambos lados, se posiciona el punzón hasta alcanzar el ángulo deseado. Cuando tenga el punzón situado, se enciende el motor para que empiece a generar la deformación en las láminas. Muchos de los parámetros serán modificables ya que no se han

encontrado datos contundentes con respecto a la máquina de cizallamiento. Por esta razón se implementa 2 motores, uno por cada laminadora para modificar la velocidad angular de cada uno. Ver figura 47 para el esquema del proceso.

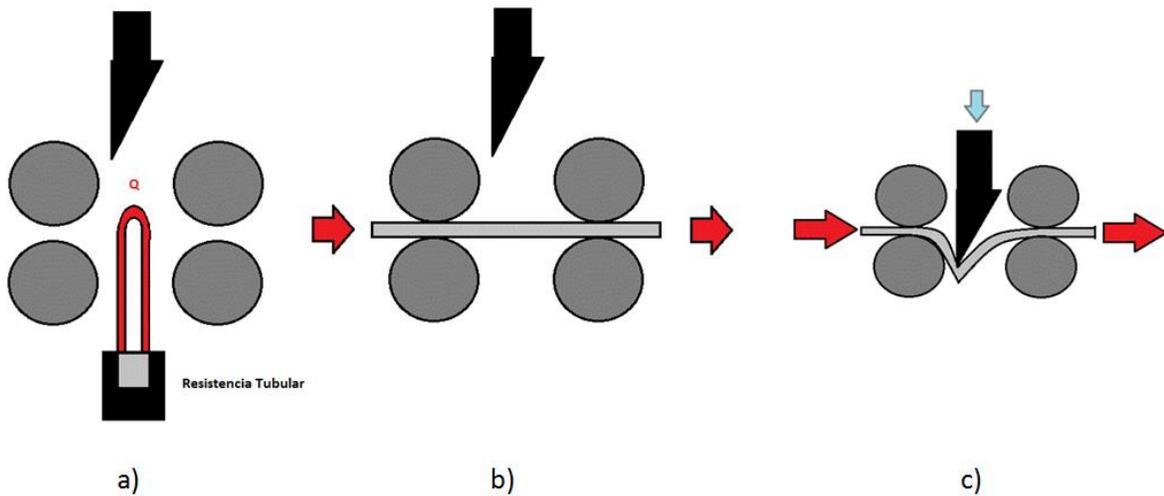


Figura 47. Proceso de cizallamiento, a) se calienta los elementos con una resistencia tubular, b) ingreso completo de la lámina, y c) se baja el punzón.

Este prototipo tiene la capacidad de configurar para que quede como el sistema ECAR. Se puede reemplazar el punzón por el dado y estudiar el comportamiento del dado, laminador con respecto a la lámina. Como es un prototipo, se diseña de tal manera para que se pueda modificar para que se pueda obtener la mayor cantidad de información y parámetros posibles y así poder diseñar un mecanismo más apropiado.

4. ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL PROTOTIPO

En la sección anterior se definió el diseño general del mecanismo. En esta sección se desea hallar los parámetros para lograr que la maquina funcione de la forma adecuada. Para lograr este objetivo, se debe de considerar como mínimo los siguientes parámetros;

- Límite de elasticidad y coeficiente de endurecimiento del material
- El ancho de la lamina
- El espesor antes y después de laminado
- Radio de los rodillos
- Coeficiente de fricción
- Velocidad de laminado.

Lo primero que se debe de conocer es el rango del espesor de la lámina, como se había mencionado anteriormente, son consideradas láminas aquellas que varían entre 6.2-0.15mm, pero por cuestiones de diseño se escogerá entre los 10-1.5mm. El ancho debe ser 10 veces el espesor (Dixit, Robi, & Sarma, 2002).

El porcentaje de reducción de las láminas es un parámetro de gran importancia. Este parámetro tiene un papel muy importante a la hora de seleccionar el motor, ya que si se quiere que la lámina tenga una reducción muy grande, se necesita implementar un motor con una potencia mayor y consecuentemente a un costo mayor, pero como teóricamente se desea que la lámina sufra una mínima reducción en el área transversal. La siguiente ecuación es una estimación aproximada de la potencia P.

$$P = \sigma_o b h_1 \frac{1-r}{1-0.5r} v \ln \frac{h_1}{h_2} = \sigma_o b h_1 \frac{1-r}{1-0.5r} v \ln \frac{1}{1-r} \text{ (Dixit, Robi, \& Sarma, 2002)}$$

Dónde:

σ_o = flujo de esfuerzo promedio

b = ancho de la lámina

h_1 = espesor de la lámina antes de laminado

h_2 = espesor de lámina despues de laminado

r = la reducción de la lámina

v = velocidad de laminado

El flujo de esfuerzo promedio de las aleaciones de magnesio puede llegar a unos 380 MPa (Friedrich & Mordike, 2006), pero para que la laminadora pueda trabajar con variedades de aleación de magnesio más amplios, se toma 450 MPa (σ_o). El máximo ancho de la lámina antes de ser laminado es de 100 mm (b), espesor es de 10 mm (h_1), espesor despues de laminado 9 mm (h_2), velocidad de laminado es de 50 m/min (0.8 m/s) (v), y la reducción de la lámina es de 1 mm (r), se tomaron estos valores ya que son los valores más críticos (máximos) a la hora de ejercer una carga.

$\sigma_o = 450 \text{ Mpa}$
 $b = 100 \text{ mm}$
 $h_1 = 10 \text{ mm}$
 $h_2 = 9 \text{ mm}$
 $r = 1 \text{ mm}$
 $v = 50 \text{ m/min}$

Reemplazando los valores en la ecuación, la potencia requerida es de aproximadamente

$$P = 375 \text{ W } (\approx 0.51 \text{ HP})$$

A continuación se escogerá el diámetro de los rodillos de laminación. Hay muchos parámetros que se deben considerar para elegir los rodillos adecuados. Por lo general, los parámetros a considerar son; el espesor de las láminas, el tipo de material a ser laminado, la máxima reducción que deseada de la lámina, el coeficiente de fricción, la velocidad de rolado, etc. Los rodillos grandes dan buena rigidez y mejor enfriamiento mientras que los rodillos pequeños requieren de una menor fuerza de laminado y son menos sensitivos en los efectos que generan los cambios de lubricantes. Existen parámetros que pueden generar fisuras en las láminas, para evitar estos problemas se debe de evitar los siguientes parámetros;

- Rodillos con radios pequeños
- Espesor inicial muy grande
- Pequeño porcentaje de reducción
- Esfuerzo a tracción en la parte delantera y trasera de las láminas.

Los autores Zhu y Avitzur formularon un criterio para prevenir las fisuras, la siguiente formula es el criterio dado por estos autores:

$$\frac{h_1}{R} > 1.81 \left(\frac{h_1}{h_2} - 1 \right)$$

Dónde:

$R = \text{radio de los rodillos}$

Se reemplazaron los valores de h_1 y h_2 y obtenemos que el radio mínimo de los rodillos es;

$$R = 4.97 \text{ cm}$$

Entre más sea la diferencia de espesores iniciales y finales, más pequeña será el radio del rodillo y como la maquina se desea que el cambio de área transversal sea mínima, el radio de rodillo es relativamente grande comparado con un laminador convencional.

Secuencia de cálculo para hallar la potencia

Como se conoce la potencia que requiere la laminadora, el paso a seguir es realizar un esquema para conocer la propagación de potencia para conocer el motor a seleccionar. En la figura 48 se puede observar el esquema de la máquina.

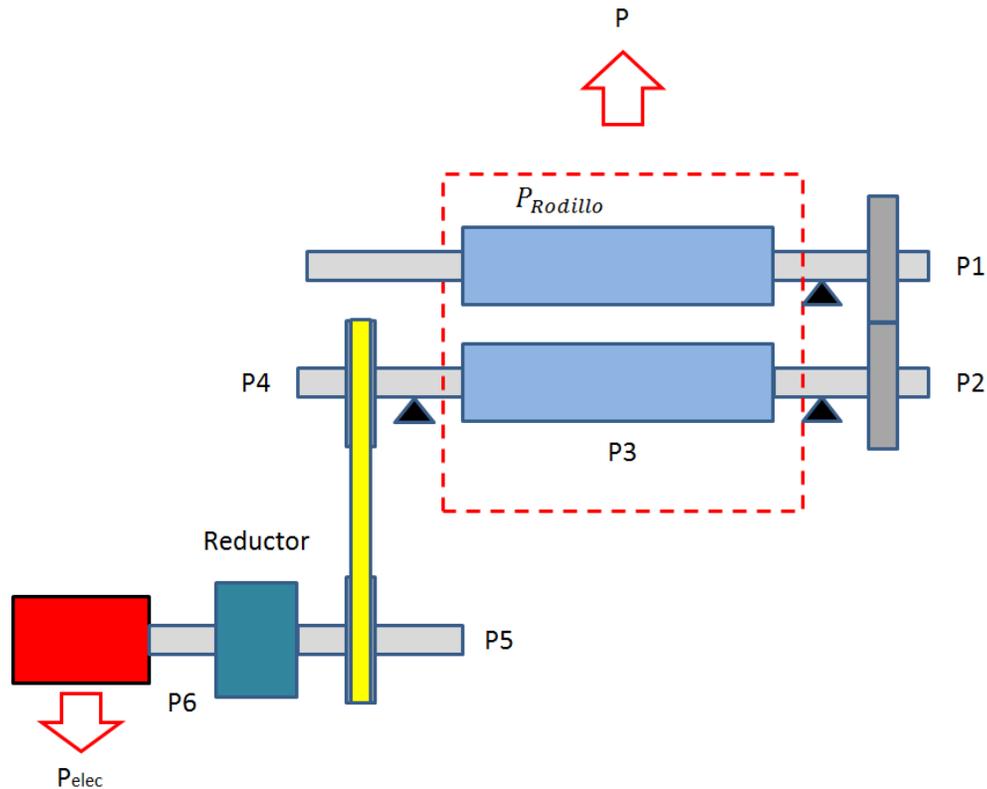


Figura 48. Propagación de potencia.

Para mejorar la alimentación de las láminas, se implementaría un sistema de engranajes en el extremo de los ejes del rodillo para que cada uno gire independientemente y de forma inversa para que pueda atravesar por el mecanismo laminador. El engranaje tendrá una relación 1:1 para que ambos ejes giren a la misma velocidad angular.

Como se desea que el mecanismo sea compacto y con el criterio del diseñador, se procede a colocar un motoreductor y a este, acoplar el sistema de cadenas y sprockets. El motoreductor se ubicaría en un plano horizontal diferente a donde está ubicado el laminador para aprovechar el espacio, el motor quedaría debajo del mecanismo laminador. Aunque se conoce que por cada sistema de transmisión de potencia existe una pérdida, ver tabla 23, por las eficiencias de cada uno de los elementos, se verifica que no hay inconveniente con el motor comercial que se seleccione.

Tabla 23. Tabla de eficiencias.

Elemento	Eficiencia
Cojinetes	0.98
Engranajes	0.95
Cadena	0.9

Como la potencia hallada era para mover el mecanismo, esta es dividida por cada rodillo y para comenzar a realizar la propagación de la potencia transmitida:

$$P_{rodillo} = \frac{P}{2} = \frac{0.51}{2}$$

$$P = 0.255 \text{ HP}$$

La potencia P1 debido a los cojinetes es:

$$P1 = \frac{P_{rodillo}}{\eta_{cojinete}} = \frac{0.255 \text{ HP}}{0.98}$$

$$P1 = 0.260 \text{ HP}$$

La potencia P2 debido al engranaje:

$$P2 = \frac{P1}{\eta_{engranaje}} = \frac{0.260 \text{ HP}}{0.95}$$

$$P2 = 0.273 \text{ HP}$$

La potencia P3 se debe sumar la potencia por el rodillo más la eficiencia consumida en el cojinete:

$$P3 = \frac{P_{rodillo} + P2}{\eta_{cojinete}} = \frac{(0.255 + 0.273) \text{ HP}}{0.98}$$

$$P3 = 0.539 \text{ HP}$$

La potencia P4 debido al cojinete:

$$P4 = \frac{P3}{\eta_{cojinete}} = \frac{0.539 \text{ HP}}{0.98}$$

$$P4 = 0.55 \text{ HP}$$

La potencia P5 debido a la cadena:

$$P5 = \frac{P4}{\eta_{cadena}} = \frac{0.55 \text{ HP}}{0.9}$$

$$P5 = 0.611 \text{ HP}$$

La potencia P6 debido al reductor, que simplemente es un sistema de engranaje:

$$P6 = \frac{P5}{\eta_{engranaje}} = \frac{0.611 \text{ HP}}{0.95}$$

$$P6 = 0.643 \text{ HP}$$

Con la potencia consumida a través de todo el sistema, se procede a buscar el motor adecuado para la máquina. El motor que está más próximo a la potencia consumida es de 0.75 HP

$$P_{nom,motor} \geq p_{consumida} * F.S$$

$$0.75 \geq 0.599 * 1.05$$

$$0.75 \geq 0.675$$

Como cumple la condición, el motor de 0.75 HP es lo suficiente para el mecanismo.

Selección del reductor

Se tiene un intervalo de velocidad de operación entre 5-50 m/min (aprox. 16-160 rpm). Como se desea que la maquina sea compacta, habrá 2 etapas de reducción de velocidad para que entre cada reducción, no haya una relación de transmisión muy drástico. Primero se acopla un reductor donde se encargara de reducir la velocidad de 1800 rpm a unas 320 rpm aproximadamente y por medio de cadenas y sprockets, se reducirá hasta los 160 rpm. Como se requiere variar la velocidad angular de la laminadora, se instala un variador de frecuencia para alcanzar los límites inferiores (16 rpm).

Del catálogo de motorreductor de Nord, se toma el tipo de modelo SK 02 -80S/4.

Inercia generalizada:

Se debe hallar la inercia del sistema para determinar si es necesario acoplar una volante de inercia para que la maquina funcione. Para hallar la inercia se calcula con la siguiente ecuación.

$$J = \sum_{i=1}^n I_n * K_n$$

Donde;

I=inercia de un cilindro (aplica para diferentes elementos del sistema)

$$I = \frac{1}{2} m * r^2$$

Donde:

m=masa

r=radio

K: es el coeficiente de inercia generalizada y es la relación entre la velocidad angular del elemento de interés con la velocidad angular del elemento motriz.

$$K = \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2$$

En la tabla 24. Se puede observar la inercia generalizada de la laminadora.

Tabla 24. Inercia Generalizada

Elemento	Inercia (kg m ²)	Coeficiente K	Inercia generalizada @ Eje I
Motor	0.00080	1.00000	0.000800
reductor	0.01143	0.03160	0.000361
Polea menor	0.00012	0.03160	0.000004
Polea mayor	0.00098	0.00790	0.000008
Rodillo 1	0.17700	0.00790	0.001399
Rodillo 2	0.14200	0.00790	0.001122
Engranaje 1	0.03641	0.00790	0.000288
Engranaje 2	0.02770	0.00790	0.000219
carga	0.00003	0.00790	0.000000
Total			0.003400

Con la inercia generalizada hallada anteriormente, se calcula el torque de arranque que se requiere para que el sistema pueda operar satisfactoriamente, ver tabla 25 para ver el resultado del torque de arranque necesario para el sistema.

Tabla 25. Torque de Arranque del sistema.

Cálculo de torque de arranque	
Velocidad inicial (rpm)	0.0000
Velocidad final (rpm)	1630.0000
Delta velocidad (rad/s)	170.6932
Delta tiempo (s)	0.5000
Aceleración promedio (rad/s ²)	341.3864
Inercia generalizada (kg*m ²)	0.0034
Torque de arranque (N*m)	1.1607

Se compara el valor de torque de arranque del sistema con el proporcionado por el fabricante del motor, en la tabla 26 se puede observar el torque de arranque del motor

Tabla 26. Torque de arranque del motor seleccionado.

Motor Siemens 0.75 HP @ 1650 rpm	
Torque nominal (Nm)	3.3
Tarr/Tnom	1.9
Torque arranque (Nm)	6.27

Como el torque de arranque que suministra el motor es mayor que el del sistema, no hay necesidad de implementar la volante.

Selección de cadenas y sprockets

Conociendo la potencia nominal, hallado anteriormente en la propagación de transmisión de potencia, se diseña el sistema de cadenas y sprockets.

La potencia de diseño es:

$$Pot_{diseño} = Pot_{nominal} * F.S$$

Donde el factor de seguridad F.S. se halla mediante la tabla 27:

Tabla 27. Factor de seguridad.

Factores para calcular el margen compensatorio de seguridad			
Tipo de carga	Clase de la fuente de potencia		
	Motor de combustión interna con convertidor hidráulico	Motor eléctrico o turbina	Motor de combustión interna con embrague o caja mecánica
Uniforme	1.0	1.0	1.2
Fluctuante	1.2	1.3	1.4
Muy fluctuante	1.4	1.5	1.7

Según el manual del fabricante, las laminadoras se pueden considerar como un sistema con carga fluctuante y se toma un factor de seguridad F.S de 1.5.

$$Pot_{diseño} = 0.611 \text{ HP} * 1.5$$

$$Pot_{diseño} = 0.917 \text{ HP}$$

Según la tabla ANSI para asignación de cadena, se puede seleccionar una cadena ANSI 60 (3/4") de un solo torón para una potencia de 0.917 HP y una velocidad de 35 rpm (rpm del piñón más pequeño) Nota: Se toma la velocidad de 35 rpm (límite inferior de velocidad angular para el piñón conductor obtenido en la salida del reductor), ya que a una velocidad más lenta, el torque es mayor y para evitar que falle la cadena, se tomó el valor más crítico.

Para una cadena ANSI 60 (paso de 3/4") a aproximadamente de 35 rpm con una potencia de diseño de 0.917, se utiliza un sprocket de 17 dientes. Como la relación de velocidad es 2:1, el sprocket mayor tiene 34 dientes. La lubricación es de tipo A, lo cual significa que la lubricación es manual con aceitera o brocha. Se analiza el caso cuando la maquina se trabaja en los otros extremos, cuando se trabaja a 355 rpm, pero no se espera ningún inconveniente ya que la cadena estaría sobredimensionada debido a que se seleccionó cuando se trabaja en el punto más crítico y los sprockets tampoco generaría problemas ya que las cargas que soportaría son menores.

Se procede a buscar los sprockets del catálogo comercial UST según los datos obtenidos anteriormente para conocer las características de los sprockets. Como se requiere que la distancia entre centros se encuentre a una distancia entre centros de 0.5 m aproximadamente, se halla la longitud de cadena (en pasos):

$$L = 2 * C + \frac{N + n}{2} + \frac{(N - n)^2}{4 * \pi^2 * C}$$

Donde;

N: Numero de dientes sprocket mayor

n: Numero de dientes sprocket menor

C: Distancia de centros (en pasos)

$$L = 57.957 \approx 58 \text{ pasos}$$

Con la longitud de paso definido, se procede a hallar la distancia entre centros corregido con la siguiente ecuación:

$$C = \frac{L - \frac{N + n}{2} + \sqrt{\left(L - \frac{N + n}{2}\right)^2 - 8 \frac{(N - n)^2}{4 * \pi^2}}}{4}$$

$$C = 0.509 \text{ m}$$

En el diseño, se debe tener en cuenta que se debe de implementar unos tensores para evitar cadenas flojas y desgastes.

Se instalan los tensores de manera estándar que consiste en acoplar en mecanismo en la parte floja de la transmisión por la parte exterior de la cadena y cerca al piñon motriz.

Las condiciones para este tipo de montaje son que el diámetro del rodillo sea como mínimo 2/3 del diámetro de la polea pequeña y que el ancho del rodillo sea 20% superior al ancho de la correa.

Se decide implementar un tensor tipo estándar, con referencia 06-510-004, con un accesorio adicional para el montaje del sistema. Ver Anexo 6.

Eje laminadora

Los ejes son un componente muy importante debido a que siempre están asociados a elementos de transmisión de potencia. Se debe asegurar de que el componente pueda sustentar todos los elementos que estén asociado a ellas para su buena funcionalidad. Como cada elemento de sustentación implica un concentrador de esfuerzos, se debe de diseñar de tal forma de que el eje no falle.

En la figura 49, se puede observar el esquema de cómo va a ir asociados los elementos de transmisión de potencia, los elementos de sustentación y los elementos de conectividad. Solo se realizara el análisis para el rodillo inferior ya que es la que más cargas soporta. El rodillo superior, siendo muy similar a la inferior, la única diferencia en el diseño es que no posee la polea encargado de transmitir la potencia que recibe del motor.

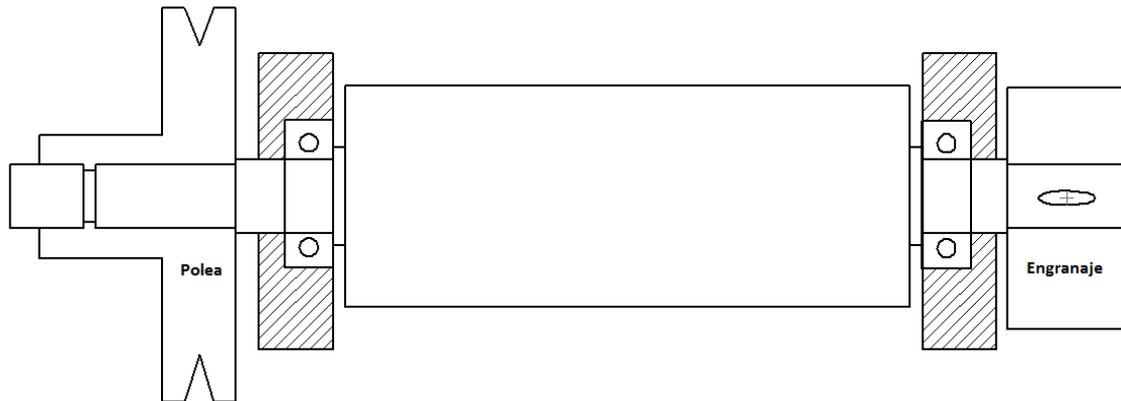


Figura 49. Esquema del eje.

Los elementos de sustentación del eje es el rodamiento. Como el eje no soporta cargas axiales se puede implementar rodamientos rígidos de bolas. Se debe tener presente que como el eje se va a someter a calentamiento, se debe implementar rodamientos para altas temperaturas. Estos elementos se seleccionan una vez que se haya hallado las reacciones del eje.

En la figura 50, se puede observar todas las fuerzas que actúan en el eje. Se debe hallar las reacciones en cada punto para determinar el punto más crítico sometido a los momentos.

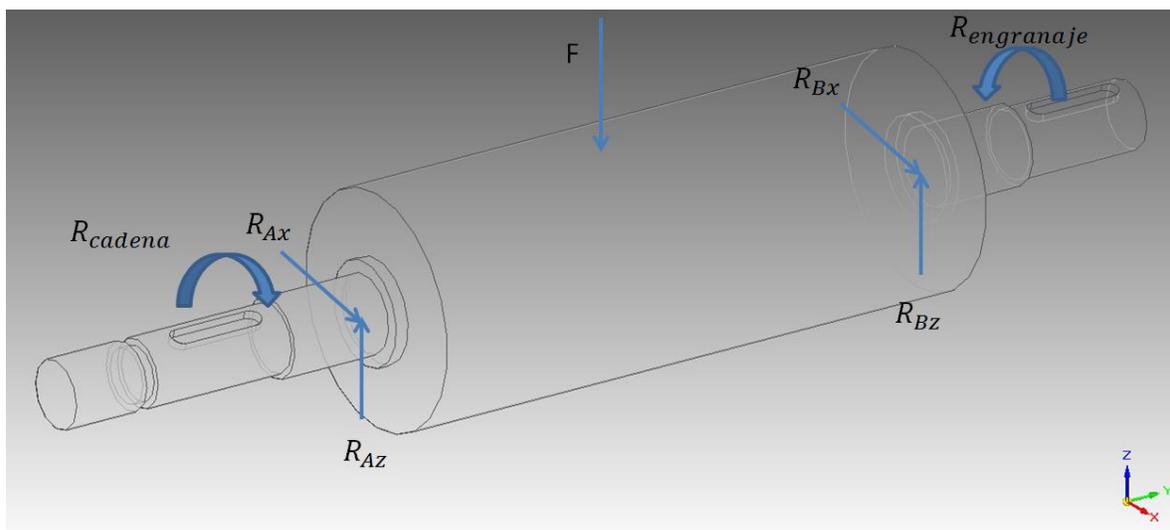
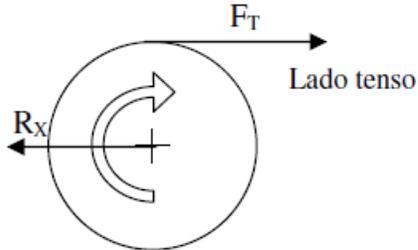


Figura 50. Fuerzas que actúan en el eje

Se debe calcular las fuerzas y reacciones en los apoyos.

Para las reacciones de la cadena y el engranaje, la fuerza se haya de la siguiente manera:

Fuerzas en sprockets



En el lado flojo no hay tensión, por ello:

$$R_x = F_T = \frac{2 \cdot T}{dp} = \frac{2 \cdot T \cdot \sin\left(\frac{180^\circ}{N}\right)}{P}$$

Donde:

T: torque

dp: diámetro primitivo

N: número de dientes

P: Paso de cadena

$$R_x = \frac{2 * T}{dp}$$

Donde:

$$T = \frac{P}{w}$$

P=636.827 W

w=1.674 rad/s

dp=0.206m

$$T = 380.422 Nm$$

$$R_x = 3693.42N$$

Fuerzas debido al rodillo

Como la potencia hallada en la laminación fue para ambos rodillos se divide por 2 para hallar la potencia por cada eje;

$$P = \frac{375 W}{2} = 187.5 W$$

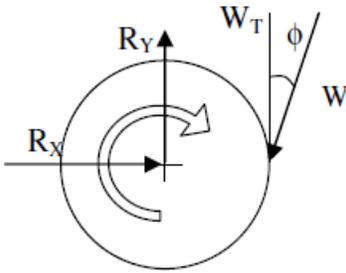
Para hallar torque:

$$T = \frac{P}{w} = \frac{187.5}{3.663} = 51.19 \text{ Nm}$$

Como el radio del rodillo es 5 cm (0.05m)

$$F = \frac{51.19}{0.05} = 1023.75 \text{ N}$$

Fuerzas en engranajes rectos



$$R_y = W_T = \frac{T}{r_p} = 2 \cdot \frac{T}{d_p} = 2 \cdot \frac{P_d \cdot T}{N}$$

$$R_x = W_R = W_T \cdot \tan \phi$$

$$W = \frac{W_t}{\cos \phi}$$

Donde:

$$P=203.576 \text{ W}$$

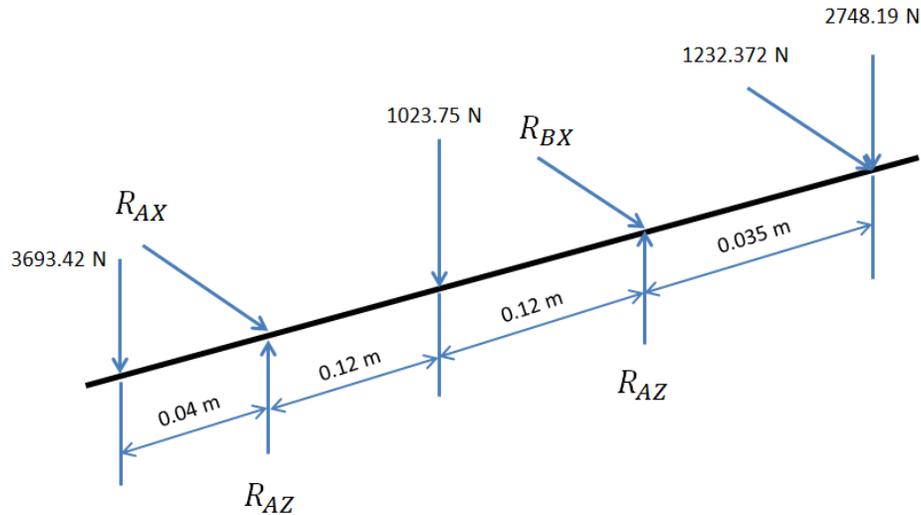
$$d_p=0.0902 \text{ m}$$

$$T = \frac{P}{w} = \frac{203.576}{3.663} = 55.58 \text{ Nm}$$

$$R_y = \frac{2 * 55.58}{0.0902} = 1232.372 \text{ N}$$

$$R_x = R_y * \tan 20 = 2748.19 \text{ N}$$

Se ubican todas las fuerzas, el diagrama de fuerzas quedaría de la siguiente manera:



Con la sumatoria de fuerzas y momentos se deben hallar las reacciones en los cojinetes:

En Z

$$\sum M = 0$$

$$3693.42(0.04) - 1023.75(0.12) + R_{BZ}(0.24) - 2748.19(0.275) = 0$$

$$R_{BZ} = 3045.273 \text{ N}$$

$$\sum F = 0$$

$$-3693.42 + R_{AZ} - 1023.75 + 3045.273 - 2748.19 = 0$$

$$R_{AZ} = 4420.087 \text{ N}$$

En X

$$\sum M = 0$$

$$-R_{BX}(0.24) - 1232.372(0.275) = 0$$

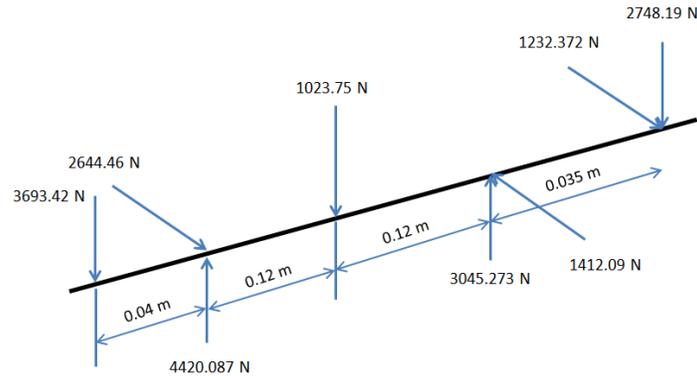
$$R_{BX} = -1412.09 \text{ N}$$

$$\sum F = 0$$

$$R_{AX} - 1412.09 - 1232.372 = 0$$

$$R_{AX} = 2644.46 \text{ N}$$

Ubicando y corrigiendo las reacciones se obtiene el diagrama de esfuerzos de la siguiente manera:



Utilizando el programa MDSolids, se hallan los diagramas de fuerzas y momentos flectores para determinar la sección más crítica del eje. En las siguientes figuras se puede observar los resultados obtenidos. En la figura 51 se puede observar los diagramas de fuerzas, cortantes y momentos flectores en el plano YZ y en la figura 52, los diagramas de fuerzas y momentos flectores en el plano XY.

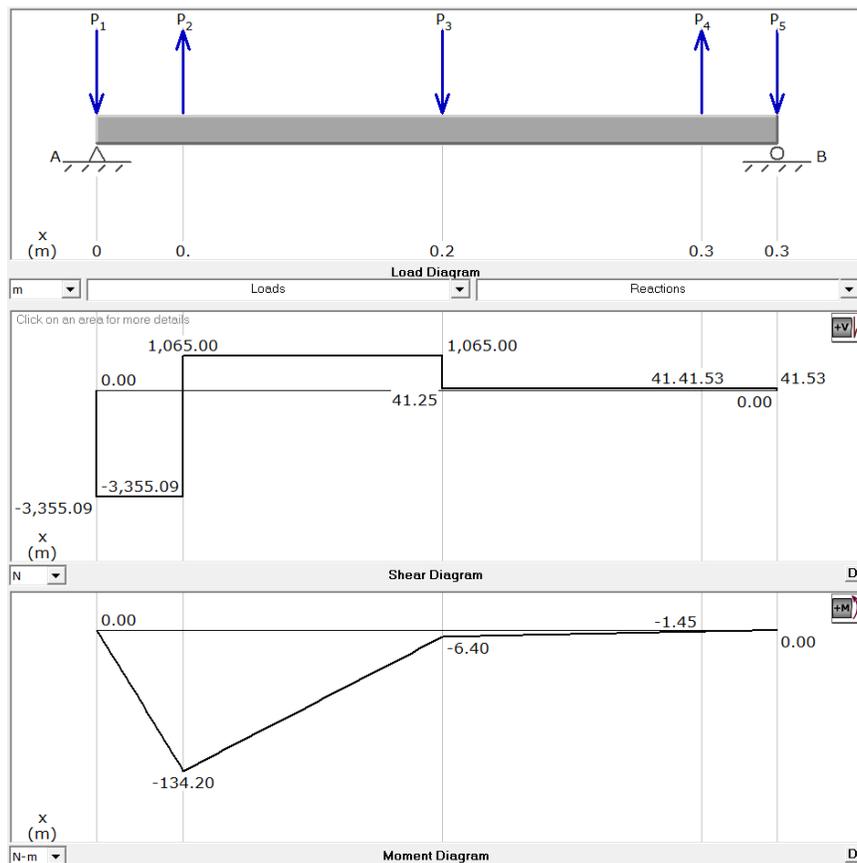


Figura 51. Diagrama de fuerzas, cortantes y momentos flectores en el plano YZ.

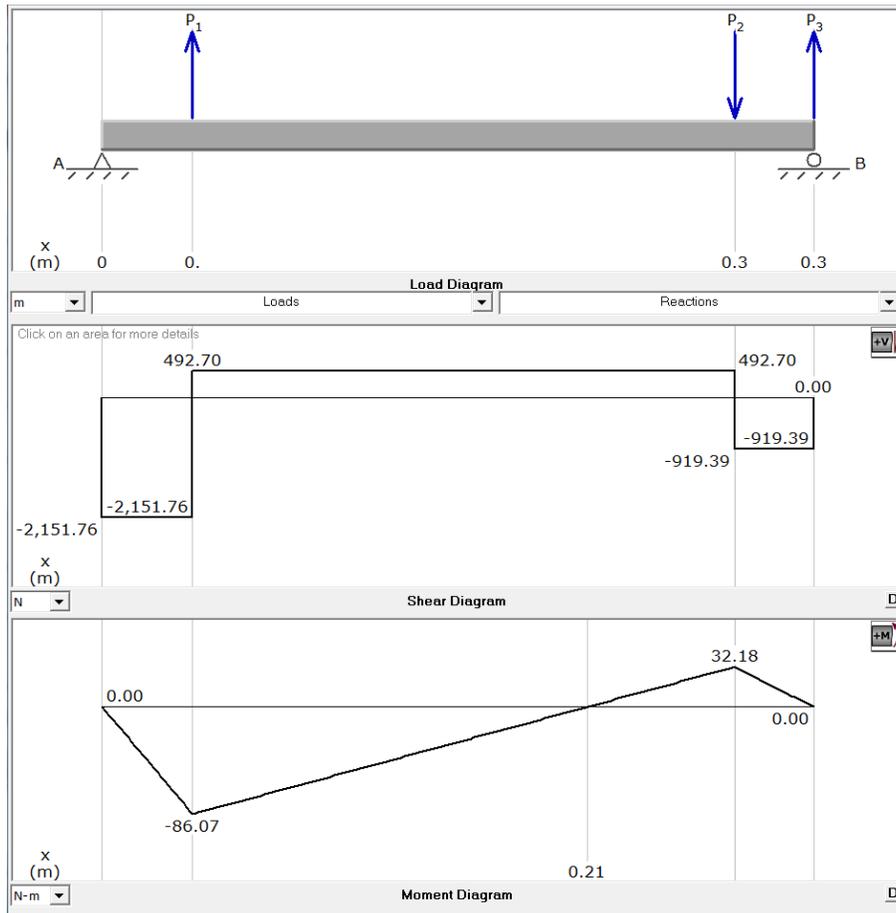


Figura 52. Diagrama de fuerzas y momentos flectores en el plano XY.

De los diagramas se puede ver que el punto más crítico es donde se encuentra la primera reacción (punto A) y es el punto a analizar

$$M_{0,4} = \sqrt{M_{AZ}^2 + M_{AY}^2} = \sqrt{134.2^2 + 86.07^2}$$

$$M_{0,4} = 159.43 \text{ Nm}$$

El momento flector y torsor en ese punto es:

$$\sigma_{Flector} = \frac{32 * M}{\pi * d^3} = 103.98 \text{ MPa}$$

$$\tau = \frac{16 * T}{\pi * d^3} = 124.06 \text{ MPa}$$

Como el elemento está sometido a unos esfuerzos cíclicos, se deben de hallar el esfuerzo alternante y media para el flector y torsor.

$$\sigma_{alt} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} = 103.98 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{med} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} = 0 \text{ MPa}$$

$$\tau_{alt} = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{2} = 62.03 \text{ MPa}$$

$$\tau_{med} = \frac{\tau_{max} + \tau_{min}}{2} = 62.03 \text{ MPa}$$

Se debe de hallar el límite de resistencia a la fatiga para asegurar el buen funcionamiento de la máquina. Este valor depende del comportamiento del material bajo ciertos parámetros, los cuales son:

Límite de resistencia a la fatiga;

Este valor indica el esfuerzo máximo que puede soportar el material y esta se expresa como una función a la resistencia última. En la tabla 25 se puede observar la resistencia a la fatiga de los materiales como los aceros y hierros. Este se obtiene por medio de datos experimentales o como una estimación a partir de la resistencia última.

Tabla 25. Límite de resistencia a la fatiga sin corregir (S_e')

Material	$S_e' @ 10^6$	Condición
Aceros	$0.5 \cdot S_{ut}$	$S_{ut} \leq 1400 \text{ MPa}$
	700 Mpa	$S_{ut} > 1400 \text{ MPa}$
Hierros	$0.4 \cdot S_{ut}$	$S_{ut} \leq 400 \text{ MPa}$
	160 Mpa	$S_{ut} > 400 \text{ MPa}$

Como el esfuerzo último del acero 1045 recocido (material del rodillo) es 565 MPa

$$S_e' = 0.5 * S_{ut} = 0.5 * 565 \text{ MPa} = 282.5 \text{ MPa}$$

Coefficiente de carga;

En el eje se somete una carga de flexión, por lo que se debe considerar un factor de carga por flexión, ver tabla 26;

Tabla 28. Factor de carga.

Carga	C_{carga}
Flexión	1.0
Axial	0.7
Combinada	0.7

$$C_c = 0.1$$

Coefficiente de tamaño;

Al aumentar el área transversal, se disminuye el esfuerzo nominal y por lo tanto en el incremento en el factor de seguridad, ver tabla 27 para hallar el factor de tamaño para piezas circulares;

Tabla 29. Factor de tamaño.

Diámetro	$C_{tamaño}$
$d < 8 \text{ mm (0.3 in)}$	1.0
$8 < d \leq 250 \text{ mm}$	$1.189 \cdot d^{-0.097}$
$0.3 < d \leq 10 \text{ in}$	$0.869 \cdot d^{-0.097}$
$d > 250 \text{ mm (10 in)}$	0.6

$$C_d = 1.189 * d^{-0.097} = 0.8548$$

Coefficiente de acabado superficial;

Cuando se tiene un acabado superficial sin imperfecciones, menores serán los concentradores de esfuerzo, ver figura 28 para la tabla de factor de acabado superficial;

Tabla 30. Factor de acabado superficial.

Acabado Superficial	A (MPa)	A (ksi)	b
Rectificado	1.58	1.34	-0.085
Maquinado o estirado en frío	4.51	2.70	-0.265
Rolado en caliente	57.7	14.4	-0.718
Forjado	272	39.9	-0.995

$$C_a = A * Sut^b = 0.922$$

Coefficiente de temperatura;

Al aumentar la temperatura, hay un impacto mayor en el material. Como se debe trabajar a temperaturas relativamente bajas, por debajo de 250°C aproximadamente, se utiliza un factor de 1.0, ver tabla 29 para la tabla de factor de temperatura;

Tabla 31. Factor de temperatura.

Temperatura	C_{temperatura}
T ≤ 450 °C	1.0
450 < T ≤ 550°C	1-0.0058(T-450°C)

$$C_t = 1$$

Coefficiente de confiabilidad;

Como son datos estadísticos, siempre habrá un error inherente en los valores dados, ver tabla 30 para conocer la tabla de coeficiente de confiabilidad;

Tabla 32. Factor de confiabilidad.

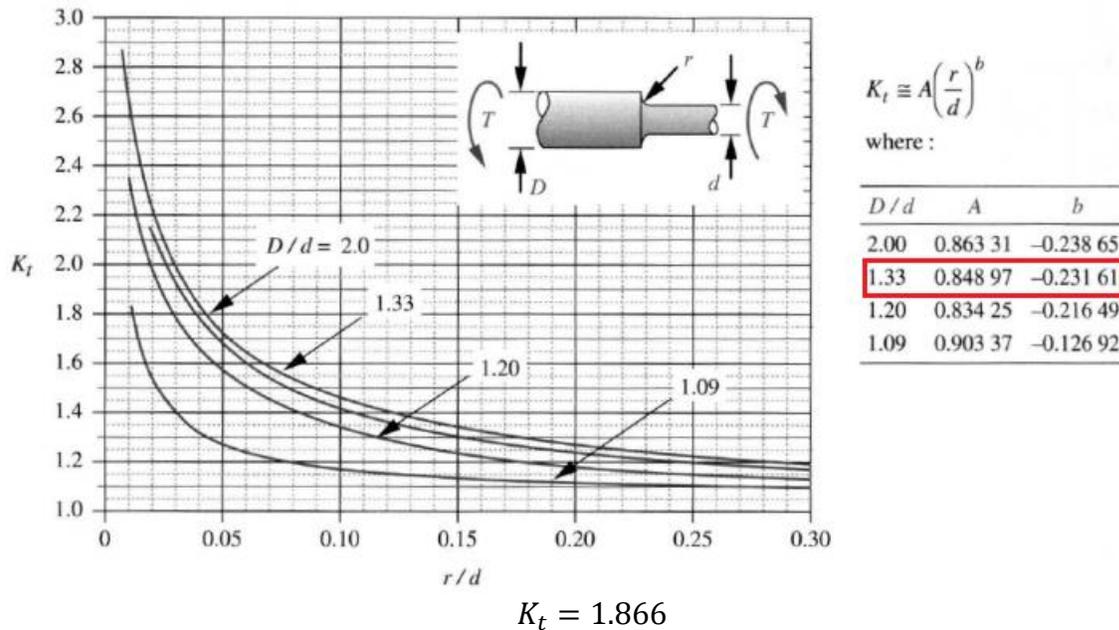
Confiabilidad	C_{confiabilidad}
50.0%	1.000
90.0%	0.897
99.0%	0.814
99.9%	0.753
99.99%	0.702
99.999%	0.659

$$C_{conf} = 0.702$$

Coefficiente de concentrador de esfuerzo;

Las discontinuidades en la geometría en el eje ocasionan concentradores de esfuerzo. La tabla 30 es para hallar el coeficiente para los concentradores de esfuerzo para ejes que presentan torsión

Tabla 33. Coeficiente de concentrador de esfuerzo.



Coeficiente de corrección;

$$S_e = S_e' * C_c * C_d * C_a * C_t * C_{conf} * K_t = 291.676MPa$$

En figura 51 se puede observar un diagrama que indica cuantos ciclos puede soportar el eje antes de que falle por fatiga. Como se conoce el esfuerzo que soportara la pieza, que son unos 450 MPa (esfuerzo más crítico), es posible hallar la vida útil, en ciclos. Según el diagrama de S-N, la pieza debe fallar a los 10000 ciclos.

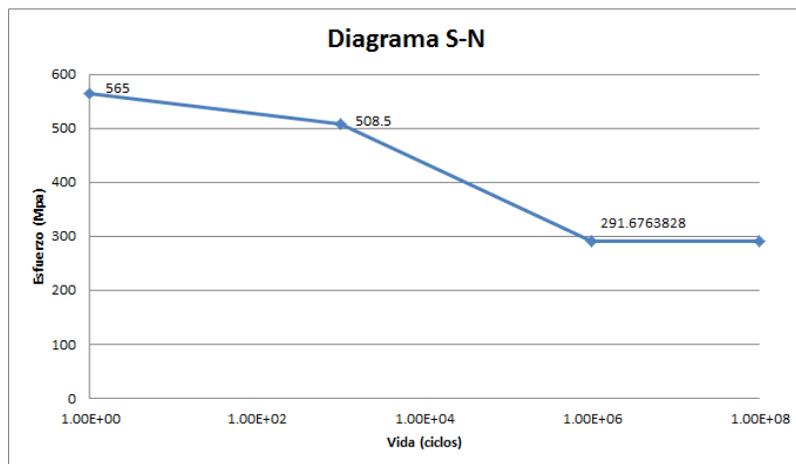


Figura 53. Diagrama S-N

La figura 54 muestra la línea de falla según el criterio de Goodman. Se puede observar dentro de la gráfica el estado de esfuerzo aplicado y sus coordenadas se obtienen según el esfuerzo medio y el esfuerzo alternante.

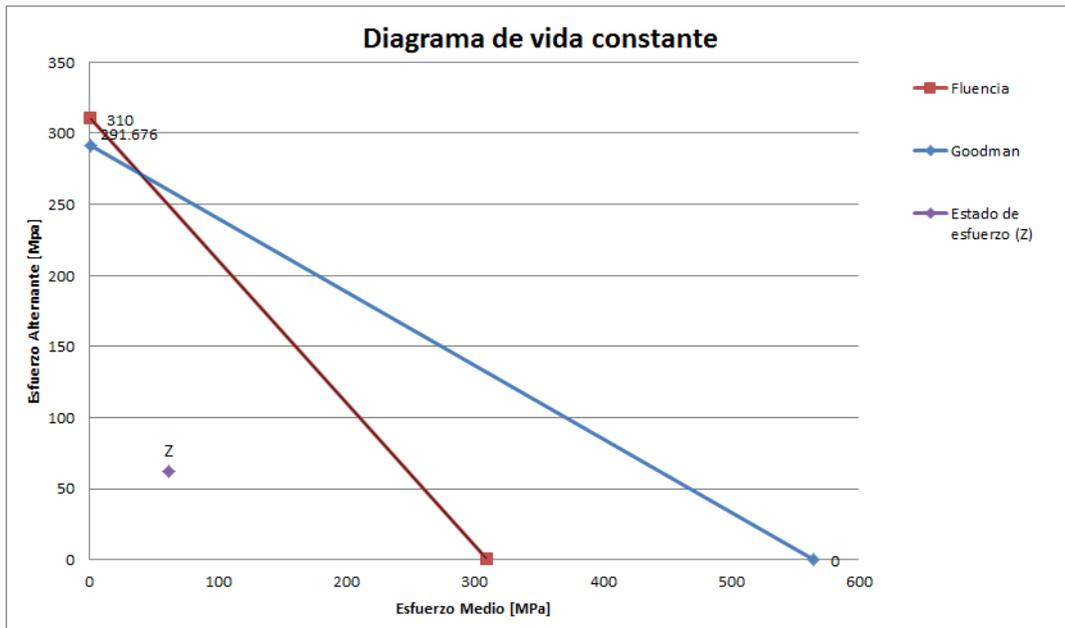


Figura 54. Diagrama de vida constante.

Tabla 34. Factores de seguridad bajo fatiga.

Nf1	3.998
Nf2	2.243
Nf3	1.974
Nf4	1.847

El Factor Nf1 se utiliza cuando el esfuerzo alternante se mantiene constante durante la vida útil de la pieza y el esfuerzo medio puede aumentar en condiciones de servicio normal.

El factor Nf2 se utiliza cuando el esfuerzo medio se mantiene constante durante la vida útil de la pieza y el esfuerzo alternante puede aumentar bajo condiciones de servicio normal.

El factor Nf3 se utiliza cuando el esfuerzo alternante y el esfuerzo medio puede aumentar en condiciones de servicio normal pero su relación se mantiene constante.

El factor Nf_4 se utiliza cuando ambos esfuerzos aumentan bajo condiciones de servicio normal pero su variación es independiente.

Como se puede observar de la figura 54, el punto Z, que se obtiene con los esfuerzos alternantes y medios, está ubicado debajo de la línea de fluencia y la línea de Goodman lo cual se considera como zona segura. Como se encuentra en la zona segura, se cumple que todos los valores de factores de seguridad son mayores que uno, siendo la Nf_4 , la menor ya que este factor se calcula utilizando la distancia más corta entre el punto Z y la línea de falla más próxima.

Selección de Rodamiento

El tamaño de rodamiento se selecciona de acuerdo con la capacidad de carga estática. La ecuación es:

$$C_o = 1.5 \frac{G_o}{f_T}$$

Donde:

C_o =capacidad de carga estática

G_o =carga radial = 5150.76N

f_T =factor de temperatura (0.64 a una temperatura de 350°C)

El factor de temperatura se halla en la tabla 35

Tabla 35. Factor de Temperatura

Temperatura de funcionamiento (°C)	Factor f_T
150	1
200	0.95
250	0.9
300	0.8
350	0.64

$$C_o = 12072.094$$

Se busca del catálogo de SKF para rodamientos para temperaturas extremas y teniendo el diámetro del eje y la capacidad de carga estática y se opta por la referencia 6206-2Z/VA201.

Cuñas

Las cuñas son elementos que sirven principalmente para la transmisión de potencia desde un eje a un elemento. Las cuñas vienen en tamaños comerciales que se eligen de acuerdo al tamaño del eje. Ver tabla 36 para las cuñas rectangulares.

Tabla 36. Cuñas rectangulares.

Diámetro eje (in)		Tamaño cuña (in)		Profundidad cuñero (in)
Desde	hasta	Ancho	Alto	
5/16	7/16	3/32	3/32	3/64
7/16	9/16	1/8	3/32	3/64
		1/8	1/8	1/16
9/16	7/8	3/16	1/8	1/16
		3/16	3/16	3/32
7/8	1 1/4	1/4	3/16	3/32
		1/4	1/4	1/8
1 1/4	1 3/8	5/16	1/4	1/8
		5/16	5/16	5/32
1 3/8	1 3/4	3/8	1/4	1/8
		3/8	3/8	3/16
1 3/4	2 1/4	1/2	3/8	3/16
		1/2	1/2	1/4
2 1/4	2 3/4	5/8	7/16	7/32
		5/8	5/8	5/16
2 3/4	3 1/4	3/4	1/2	1/4
		3/4	3/4	3/8

Con el criterio del diseñador, se debe de calcular la longitud de la cuña, de acuerdo al torque, de tal manera que cuando hay una falla en el sistema, este actué como un fusible mecánico. La ecuación para hallar la longitud de la cuña es:

$$L_{min} = \frac{F_T * FS}{w * S_{ys}}$$

Donde;

F_T =fuerza tangencial

FS=factor de seguridad

w=ancho de la cuña

S_{ys} =fluencia a cortante

Para aplicaciones industriales el factor de seguridad es 3

$$L_{min} = \frac{2748.2N * 3}{0.00635m * (310 * 10^6)Pa} \approx 0.0041m$$

$$\approx 4.1mm$$

4.1. Planos de ensamble

Los planos de taller de los componentes del prototipo para el dispositivo de laminación por cizallamiento se encuentran en el anexo. Los planos están a escala para que pueda ocupar el espacio del tamaño carta. Los planos a escala real estarán adjuntos al trabajo.

CONCLUSIONES

Basados en la revisión del estado del arte para máquinas que se han desarrollado durante la última década, a fin de realizar un prototipo que cumpla los requerimientos de este trabajo, se desarrolló el diseño de un prototipo que genera deformación por cizallamiento en las láminas de magnesio de forma continua sin un cambio significativo en el área transversal de las láminas. Se consideraron los parámetros que podrían afectar la microestructura de las láminas y se diseñó la máquina de tal manera para que la mayoría de los parámetros que tienen una incidencia apreciable en la microestructura y las propiedades mecánicas de las láminas fueran modificables por el usuario. Estos parámetros son: ángulo de deformación, apertura entre los rodillos y manipular independientemente las velocidades para cada etapa de laminación.

Para el desarrollo del prototipo, se evaluaron los componentes teniendo en cuenta su proceso de manufactura y aplicación. Con Solid Edge, se integra todos los componentes para obtener el prototipo con el desempeño planteado y finalmente se entrega los planos de taller de los componentes para su fabricación.

La implementación de la máquina en los procesos de laminación será beneficioso ya que permite mejorar las propiedades de las láminas de magnesio, o cualquier otro tipo de aleación metálica, sin elevar excesivamente los costos de fabricación debido a pos-procesamientos.

REFERENCIAS

- Aparicio Bádenas, C., Manero Planella, J., Rodríguez Rius, D., Doménech, A. A., Arandés Salvadó, P. M., & Planell Estany, J. (2001). *Aleaciones ligeras*. Barcelona: Francisco Javier Gil Mur.
- Askeland, D. R., & Phulé, P. (2004). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. México: Thomson.
- Azushima, A., Kopp, R., Korhonen, A., Yang, D., Micari, F., Lahoti, G., et al. (2008). Severe plastic deformation (SPD) processes for metals.
- Bádenas, A., Planella, M., Rius, R., Doménech, Salvadó, A., & Estany, P. (2001). *Aleaciones Ligeras*.
- Biswas, S., Dhinwal, S. S., & Suwas, S. (2010). Room-temperature equal channel angular extrusion of pure magnesium.
- Cengel, Y., & Boles, M. (2009). *Termodinámica*. México: McGraw-Hill.
- Chen, Y. J., Wang, Q. D., Roven, H. J., Karlsen, M., Yu, Y. D., Liu, M. P., et al. (2007). Microstructure evolution in magnesium alloy AZ31 during cyclic extrusion compression.
- Chen, Z. H., Cheng, Y. Q., & Xia, W. J. (2007). Drawability of AZ31 magnesium alloy sheet produced by equal channel angular rolling at room temperature. *Materials Characterization*, 617-622.
- Chung, Y.-H., Han, J.-H., Lee, J.-C., & Seok, H.-k. (2001). Controlling the textures of metal strips via the continuous confined strip shearing (C2S2) process. *Materials Research Bulletin*, 997-1004.
- Dixit, U. S., Robi, P. S., & Sarma, D. K. (2002). A systematic procedure for the design of a cold rolling mill.
- Figueiredo, R. B., Terzi, S., & Langdon, T. G. (2010). Using X-ray microtomography to evaluate cavity formation in a superplastic magnesium alloy processed by equal-channel angular pressing.
- Friedrich, H. E., & Mordike, B. L. (2006). *Magnesium Technology*. Stuttgart: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna*. Mexico: McGraw-Hill.

- Hu, H.-j., Pan, F.-s., & Zhang, D.-f. (2010). Die structure optimization of equal channel angular extrusion for AZ31 magnesium alloy based on finite element method. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 259-266.
- Huang, J., Zhu, Y. T., Alexander, D. J., Liao, X., Lowe, T. C., & Asaro, R. J. (2003). Development of repetitive corrugation and straightening.
- Ji, Y., & Park, J. (2008). Analysis of thermo-mechanical process occurred in magnesium alloy AZ31 sheet during differential speed rolling. *Materials Science and Engineering*, 299-304.
- Khakbaz, F., & Kazeminezhad, M. (2011). Work hardening and mechanical properties of severely deformed AA3003 by constrained groove pressing.
- Kim, W., Park, J., Wang, J., & Yoon, W. (2007). Realization of low-temperature superplasticity in Mg-Al-Zn alloy sheets processed by differential speed rolling.
- Kyungjin, K., & Jonghun, Y. (2013). Evolution of the microstructure and mechanical properties of AZ61 alloy processed by half channel angular extrusion (HCAE), a novel severe plastic deformation process.
- Lee, J. C., Seok, H. K., & Suh, J. Y. (2002). Microstructural evolutions of the Al strip prepared by cold rolling and continuous channel angular pressing.
- Lee, S. H., Tsuji, N., Utsunomiya, H., & Sakai, T. (2001). Role of shear in ultragrain refinement by accumulative roll-bonding (ARB) process.
- Lin, J., Wang, Q., Peng, L., & Roven, H. J. (2008). Microstructure and high tensile ductility of ZK60 magnesium alloy processed by cyclic extrusion and compression.
- Lobosco, O. S., & Da Costa Dias, J. L. (1989). *Selección y aplicación de motores eléctricos*. Berlin: Siemens Aktiengesellschaft.
- Matsuzawa, H., Utsunomiya, H., Kawamoto, T., & Saito, Y. (1998). *Satellite-mill rolling of U-shaped and H-shaped wires*. Osaka: Elsevier Science.
- Nagasekhar, A., Chakkingal, U., & Venugopal, P. (2006). Equal Channel Angular Extrusion of Tubular Aluminum Alloy Specimens-Analysis of Extrusion Pressures and Mechanical Properties. *Journal of Manufacturing Processes*.
- Nakao, Y., & Miura, H. (2010). Nano-grain evolution in austenitic stainless steel during multi-directional forging .

- Orlov, D., Beygelzimer, Y., Synkov, S., Varyukhin, V., Tsuji, N., & Horita, Z. (2009). Plastic flow, structure and mechanical properties in pure Al deformed by twist extrusion.
- Senkov, O. N., Miracle, D. B., & Firstov, S. A. (2004). *Metallic Materials with High Structural Efficiency*. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher.
- Trinks, W. (1947). *Industrial Furnaces*. New York: John Wiley & Sons.
- Vorhauer, A., & Pippan, R. (2004). On the homogeneity of deformation by high pressure torsion.
- Watanabe, H., Mukai, T., & Ishikawa, K. (2006). Effect of temperature of differential speed rolling on room temperature mechanical properties and texture in an AZ31 magnesium alloy.
- Yang, X.-y., Sun, Z.-y., Xing, J., Miura, H., & Sakai, T. (2008). Grain size and texture changes of magnesium alloy AZ31 during multi-directional forging.
- Yoon, S. C., Krishnaiah, A., Chakkingal, U., & Kim, H. S. (2008). Severe plastic deformation and strain localization in groove pressing.
- Zehetbauer, M. J., & Zhu, Y. T. (2009). *Bulk Nanostructured Materials*. Weinheim: WILEY-VCH verlag GmbH & Co. KGaA.
- Zhan, M.-y., Li, Y.-y., & Chen, W.-p. (2007). Improving mechanical properties of Mg-Al-Az alloy sheets through accumulative roll-bonding.

ANEXOS

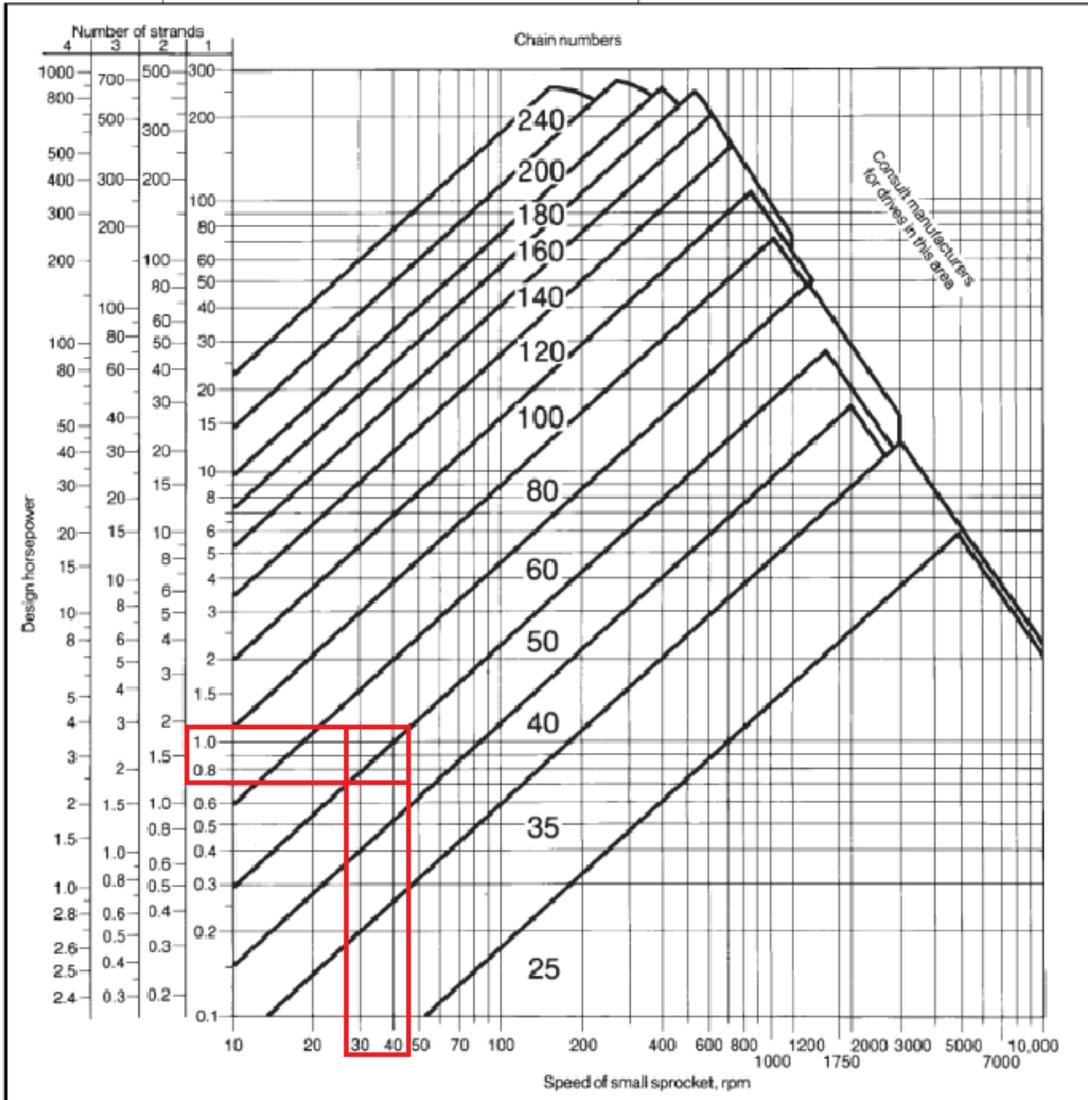
Anexo 1. Catalogo motores SIEMENS

Velocidad 1800 rpm (4 polos)															
Código Actual	Código Antiguo	Tipo	Frame IEC	HP	kW	F.S.	In a		rpm	Eficiencia η %	Torque nominal Nm	Momento de inercia Kg m ²	Torque de arranque de Tn	Intensidad como fac. de In	Peso aprox. kg
							220 V Amp.	440 V Amp.							
01108	836440	1LA7 070-4YC60	71	0.40	0.29	1.05	1.6	0.80	1640	66.0	1.74	0.0006	1.8	2.8	4.7
01109	836472	1LA7 070-4YA60	71	0.50	0.37	1.15	1.9	0.95	1590	66.0	2.20	0.0006	1.3	2.7	5.5
01110	836460	1LA7 071-4YA60	71	0.60	0.45	1.05	2.2	1.10	1645	69.0	2.60	0.0008	1.8	3.4	6.0
01111	836473	1LA7 073-4YA60	71	0.75	0.56	1.15	2.9	1.45	1650	65.0	3.30	0.0008	1.9	3.7	6.0
01112	836490	1LA7 080-4YC60	80	0.90	0.67	1.05	3.1	1.55	1675	68.0	3.83	0.0015	2.3	4.4	8.1

Anexo 2. Catalogo Motoreductores Nord

Motor Power P_n [hp]	Output Speed n_2 [rpm]	Output Torque T_2 [lb-in]	Service Factor f_B	AGMA Class	Gear Ratio i_{tot}	Standard Bearings		Heavy Duty Bearings (VL)		Model Type	Weight  [lb]	Dim. Page
						F_{RN} OHL [lb]	F_{AN} Thrust [lb]	F_{RVL} OHL [lb]	F_{AVL} Thrust [lb]			
0.75	1267	37	5.6	III	1.35		549			SK 11E - 80S/4	31	152
	1110	43	5.5	III	1.54		581					
	945	50	5.3	III	1.81		623					
	838	56	5.1	III	2.04		657					
	737	64	4.9	III	2.32		693					
	604	78	4.6	III	2.83		756					
	538	88	4.0	III	3.18		797					
	475	100	3.7	III	3.60		837					
	211	224	1.2	I	8.10		956					
580	82	4.7	III	2.95	331	558	470	666	SK 02 - 80S/4	35	167	
506	94	4.5	III	3.38	344	590	488	693				
440	108	4.3	III	3.89	358	619	511	722				
405	117	3.9	III	4.22	369	646	524	743				
355	133	3.8	III	4.82	383	671	542	767				
307	154	3.3	III	5.57	401	713	569	803				
280	169	3.0	III	6.10	412	736	587	830				

Anexo 3. Tabla ANSI para selección de la cadena



Anexo 4. Tabla para la Selección del Piñón

No. de dientes piñón conductor	R.P.M DEL PIÑÓN CONDUCTOR																								
	10	25	50	100	150	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1400	1600	1800	2000	2500	3000	3500	4000	4500
9	0.15	.033	.062	1.16	1.67	2.16	3.12	4.04	4.94	5.82	6.68	7.54	8.38	9.21	9.99	8.77	6.96	5.70	4.77	4.08	2.92	2.22	1.76	1.44	1.21
10	0.16	0.37	0.70	1.30	1.87	2.43	3.49	4.53	5.53	6.52	7.49	8.44	9.39	10.3	11.2	10.3	8.15	6.67	5.59	4.77	3.42	2.60	2.06	1.69	1.41
11	0.18	0.41	0.77	1.44	2.07	2.60	3.87	5.02	6.13	7.23	8.30	9.36	10.4	11.4	12.5	11.9	9.41	7.70	6.45	5.51	3.94	3.00	2.38	1.95	1.63
12	0.20	0.45	0.85	1.58	2.28	2.95	4.25	5.51	6.74	7.94	9.12	10.3	11.4	12.6	13.7	13.5	10.7	8.77	7.35	6.28	4.49	3.42	2.71	2.22	1.86
13	0.22	0.50	0.92	1.73	2.49	3.22	4.64	6.01	7.34	8.65	9.94	11.2	12.5	13.7	14.9	15.2	12.1	9.89	8.29	7.08	5.06	3.85	3.06	2.50	0
14	0.24	0.54	1.00	1.87	2.69	3.49	5.02	6.51	7.96	9.37	10.8	12.1	13.5	14.8	16.2	17.0	13.5	11.1	9.26	7.91	5.66	4.31	3.42	2.80	0
15	0.25	0.58	1.08	2.01	2.90	3.76	5.41	7.01	8.57	10.1	11.6	13.1	14.5	16.0	17.4	18.8	15.0	12.3	10.3	8.77	6.28	4.77	3.79	3.10	0
16	0.27	0.62	1.16	2.16	3.11	4.03	5.80	7.52	9.19	10.8	12.4	14.0	15.6	17.1	18.7	20.2	16.5	13.5	11.3	9.66	6.91	5.26	4.17	3.42	0
17	0.29	0.66	1.24	2.31	3.32	4.30	6.20	8.03	9.81	11.6	13.3	15.0	16.7	18.3	19.9	21.6	18.1	14.8	12.4	10.6	7.57	5.76	4.57	3.74	0
18	0.31	0.70	1.31	2.45	3.53	4.58	6.59	8.54	10.4	12.3	14.1	15.9	17.7	19.5	21.2	22.9	19.7	16.1	13.5	11.5	8.25	6.28	4.98	4.08	0
19	0.33	0.75	1.39	2.60	3.74	4.85	6.99	9.05	11.1	13.0	15.0	16.9	18.8	20.6	22.5	24.3	21.4	17.5	14.6	12.5	8.95	6.81	5.40	4.42	0
20	0.35	0.79	1.47	2.75	3.96	5.13	7.38	9.57	11.7	13.8	15.8	17.9	19.8	21.8	23.8	25.7	23.1	18.9	15.8	13.5	9.66	7.35	5.83	0	0
21	0.36	0.86	1.55	2.90	4.17	5.40	7.78	10.1	12.3	14.5	16.7	18.8	20.9	23.0	25.1	27.1	24.8	20.3	17.0	14.5	14.4	7.91	6.28	0	0
22	0.38	0.87	1.63	3.05	4.39	5.67	8.19	10.6	13.0	15.3	17.5	19.8	22.0	24.2	26.4	28.5	26.6	21.8	18.2	15.6	11.1	8.48	6.73	0	0
23	0.40	0.92	1.71	3.19	4.60	5.96	8.59	11.1	13.6	16.0	18.4	20.8	23.1	25.4	27.7	29.9	28.4	23.3	19.5	16.7	11.9	9.07	7.19	0	0
24	0.42	0.96	1.79	3.35	4.82	6.24	8.99	11.6	14.2	16.8	19.3	21.7	24.2	26.6	29.0	31.3	30.3	24.8	20.8	17.8	12.7	9.66	7.67	0	0
25	0.44	1.00	1.87	3.50	5.04	6.52	9.40	12.2	14.9	17.5	20.1	22.7	25.3	27.8	30.3	32.7	32.2	26.4	22.1	18.9	13.5	10.3	8.15	0	0
26	0.46	1.05	1.95	3.65	5.25	6.81	9.80	12.7	15.5	18.3	21.0	23.7	26.4	29.0	31.6	34.1	34.2	28.0	23.4	20.0	14.3	10.9	8.65	0	0
28	0.50	1.13	2.12	3.95	5.69	7.37	10.6	13.8	16.8	19.8	22.8	25.7	28.5	31.4	34.2	37.0	38.2	31.3	26.2	22.4	16.0	12.2	0	0	0
30	0.54	1.22	2.28	4.26	6.13	7.94	11.4	14.8	18.1	21.4	24.5	27.7	30.8	33.8	36.8	39.8	42.4	34.7	29.1	24.8	17.8	13.5	0	0	0
32	0.57	1.31	2.45	4.56	6.57	8.52	12.3	15.9	19.4	22.9	26.3	29.7	33.0	36.3	39.5	42.7	46.7	38.2	32.0	27.3	19.6	14.9	0	0	0
35	0.63	1.44	2.69	5.03	7.24	9.38	13.5	17.5	21.4	25.2	29.0	32.7	36.3	39.9	43.5	47.1	53.4	43.7	36.6	31.3	22.4	17.0	0	0	0
40	0.73	1.67	3.11	5.81	8.37	10.8	15.6	20.2	24.7	29.1	33.5	37.7	42.0	46.1	50.3	54.4	62.5	53.4	44.7	38.2	27.3	0	0	0	0
45	0.83	1.89	3.53	6.60	9.50	12.3	17.7	23.0	28.1	33.1	38.0	42.0	47.7	52.4	57.1	61.7	70.9	63.7	53.4	45.6	32.6	0	0	0	0
	Lubricación Tipo A			Lubricación Tipo B												Lubricación Tipo C									

Anexo 5. Característica del sprocket comercial

Z	d _e	d _p	SIMPLE			DOBLE			TRIPLE		
			d _m	D ₁	A	d _m	D ₁	A	d _m	D ₁	A
8	57,6	49,78	31	12	30						
9	62,0	55,70	37	12	30						
10	69,0	61,64	42	12	30	40	16	50			
11	75,0	67,61	46	14	35	47	16	50	47	20	70
12	81,5	73,61	52	14	35	53	16	50	53	20	70
13	87,5	79,59	58	14	35	59	16	50	59	20	70
14	93,6	85,61	64	14	35	65	16	50	65	20	70
15	99,8	91,63	70	14	35	71	16	50	71	20	70
16	105,5	97,65	75	16	35	77	20	50	77	20	70
17	111,5	103,67	80	16	35	83	20	50	83	20	70
18	118,0	109,71	80	16	35	89	20	50	89	20	70
19	124,2	115,75	80	16	35	95	20	50	95	20	70
20	129,7	121,78	80	16	35	100	20	50	100	20	70
21	136,0	127,82	90	20	40	100	20	50	100	20	70
22	141,8	133,86	90	20	40	100	20	50	100	20	70
23	149,0	139,90	90	20	40	110	20	50	110	20	70
24	153,9	145,94	90	20	40	110	20	50	110	20	70
25	160,0	152,00	90	20	40	120	20	50	120	20	70
26	165,9	158,04	95	20	40	120	20	50	120	20	70
27	172,3	164,09	95	20	40	120	20	50	120	20	70
28	178,0	170,13	95	20	40	120	20	50	120	20	70
29	184,1	176,19	95	20	40						
30	190,5	182,25	95	20	40	120	20	50	120	20	70
31	196,3	188,31	100	20	40						
32	203,3	194,35	100	20	40	130	20	50			
33	209,3	200,40	100	20	40						
34	214,6	206,46	100	20	40						
35	221,0	212,52	100	20	40	130	20	50			
36	226,8	218,58	100	20	40	130	25	50			
37	232,9	224,64	100	20	40						
38	239,0	230,69	100	20	56	130	25	50	130	25	70
39	245,1	236,75	100	20	40						
40	251,3	242,81	100	20	40	130	25	50			
50	313,5	303,39	107	25	40						

Piñón 3/4" x 7/16"
 para cadena de rodillos
 según DIN 8187-8188
 ISO/R 606 - ANSI B. 29.1

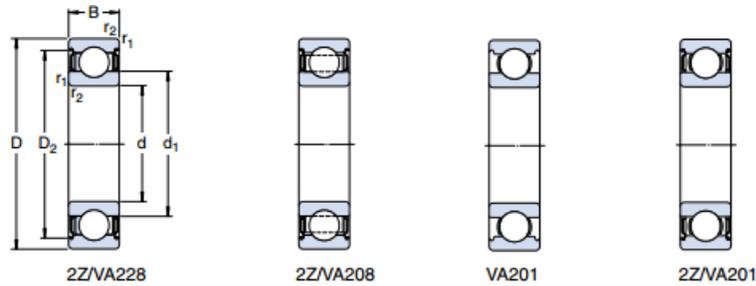
PIÑÓN	ISO mm	ASA-40 mm
Radio diente r ₃	19	20
Ancho radio C	2	2,4
Ancho radio piñón B ₁	11,1	11,6
Ancho radio piñón b ₁	10,8	11,3
Ancho radio piñón B ₂	30,3	34,1
Ancho radio piñón B ₃	49,8	56,9

CADENA	mm	mm
Paso	19,05	19,05
Ancho interior	11,68	12,7
Ø Rodillo	12,07	11,91

Anexo 6. Catalogo Rosta para la selección de tensores

Cadena de rodillos		Tipo	Art.-No.	N° de dientes	W	L	Par de apriete 0.5d [Nm]	Rango de ajuste lateral R	Tamaño SE	Peso [kg]
ANSI	DIN 8187									
Simple «S»										
35	ISO 06 B-1	N3/8"-10 S	06 510 001	15	M10	55	20	22-43 / 23-43	15 / 18	0.15
40	ISO 08 B-1	N1/2"-10 S	06 510 002	15	M10	55	20	23-44	18	0.20
50	ISO 10 B-1	N5/8"-12 S	06 510 003	15	M12	80	35	27-65	27	0.35
60	ISO 12 B-1	N3/4"-12 S	06 510 004	15	M12	80	35	27-65	27	0.55
60	ISO 12 B-1	N3/4"-20 S	06 510 005	15	M20	100	172	40-80	38	0.85
80	ISO 16 B-1	N1"-20 S	06 510 006	13	M20	100	172	40-80	38	1.25
100	ISO 20 B-1	N1 1/4"-20 S	06 510 007	13	M20	100	172	40-80 / 48-80	45 / 50	2.00
120	ISO 24 B-1	N1 1/2"-20 S	06 510 008	11	M20	140	172	40-120 / 48-120	45 / 50	2.35

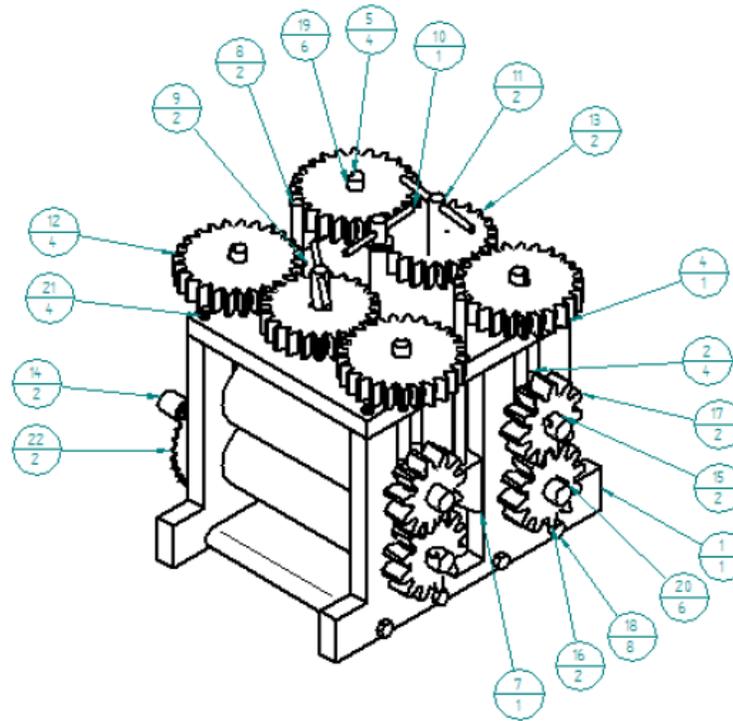
Anexo 7. Rodamientos para Temperaturas Extremas



Dimensiones principales			Capacidad de carga estática C_0	Juego interno radial		Masa kg	Designación
d	D	B		mín	máx		
mm			N	μm			
10	35	11	3 400	80	150	0,053	6300-2Z/VA201
12	32	10	3 100	100	180	0,037	6201/VA201
	32	10	3 100	100	180	0,037	6201-2Z/VA201
	32	10	3 100	100	180	0,037	6201-2Z/VA208
	32	10	3 100	100	180	0,037	6201-2Z/VA228
15	35	11	3 750	100	180	0,045	6202/VA201
	35	11	3 750	100	180	0,043	6202-2Z/VA208
	35	11	3 750	100	180	0,043	6202-2Z/VA228
17	35	10	3 250	100	180	0,039	6003/VA201
	40	12	4 750	100	180	0,065	6203/VA201
	40	12	4 750	100	180	0,060	6203-2Z/VA208
20	40	12	4 750	100	180	0,060	6203-2Z/VA228
	47	14	6 550	110	190	0,11	6204/VA201
	47	14	6 550	110	190	0,11	6204-2Z/VA201
	47	14	6 550	110	190	0,10	6204-2Z/VA208
25	47	14	6 550	110	190	0,10	6204-2Z/VA228
	52	15	7 800	110	190	0,13	6304/VA201
	52	15	7 800	110	190	0,13	6304-2Z/VA208
	47	12	6 550	120	210	0,080	6005/VA201
30	47	12	6 550	120	210	0,080	6005-2Z/VA208
	52	15	7 800	120	210	0,13	6205/VA201
	52	15	7 800	120	210	0,13	6205-2Z/VA201
	52	15	7 800	120	210	0,12	6205-2Z/VA208
	52	15	7 800	120	210	0,12	6205-2Z/VA228
	62	17	11 600	120	210	0,23	6305/VA201
30	62	16	11 200	120	210	0,20	6206/VA201
	62	16	11 200	120	210	0,20	6206-2Z/VA201
	62	16	11 200	120	210	0,19	6206-2Z/VA208
	62	16	11 200	120	210	0,19	6206-2Z/VA228

Anexo 8. Diseño del prototipo

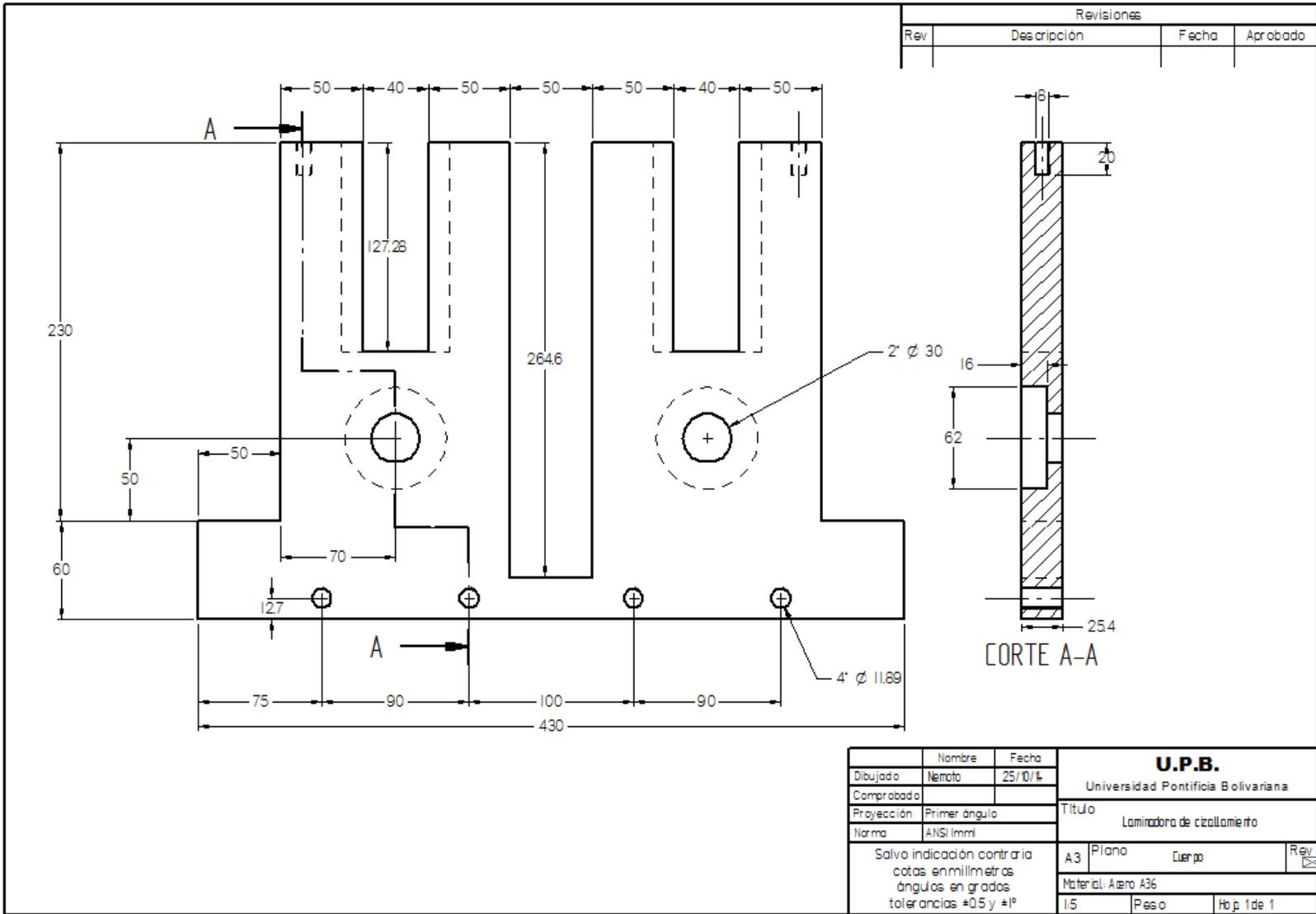
Número de elemento	Pieza	Cantidad
1	Cuerpo	1
2	Buje	4
3'	Rodamiento 62 07Z	4
4	Lamina Superior	1
5	Tornillo Elevador	4
6'	Lamina Union	2
7	Punzon	1
8	Guia Eje	2
9	Buje Elevador	2
10	Tornillo Elevador Punzon	1
11	Palanca	2
12	Engranaje $D_p=50, Z=25$	4
13	Engranaje $d_p=46, z=23$	2
14	Rodillo Inferior	2
15	Rodillo Superior	2
16	Engranaje $D_p=48, Z=12$	2
17	Engranaje $d_p=44, z=11$	2
18	Tornillo DIN 933E M-12	8
19	Cuna 2	6
20	Cuna 1	6
21	Tornillo DIN 965 M-8	4
22	Sprocket $D_p=68, Z=34$	2

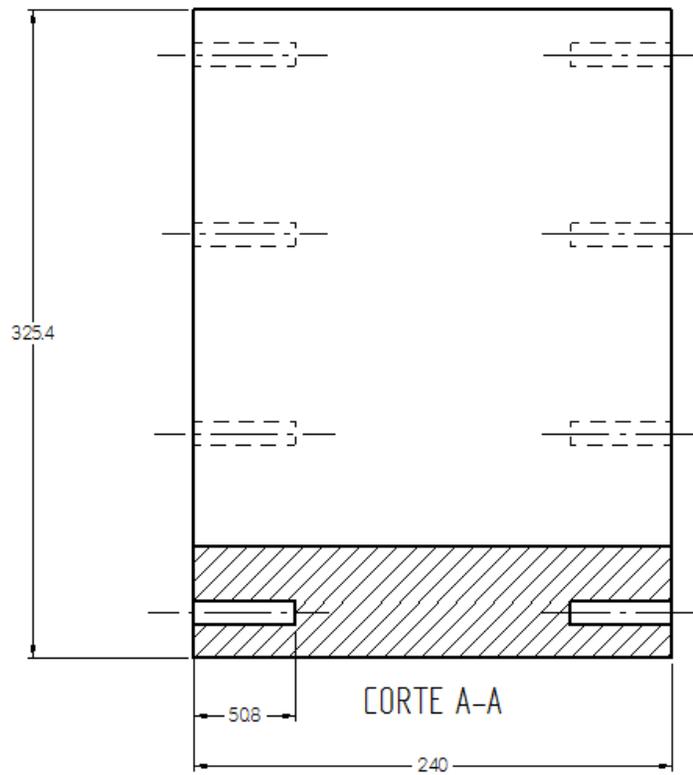


Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

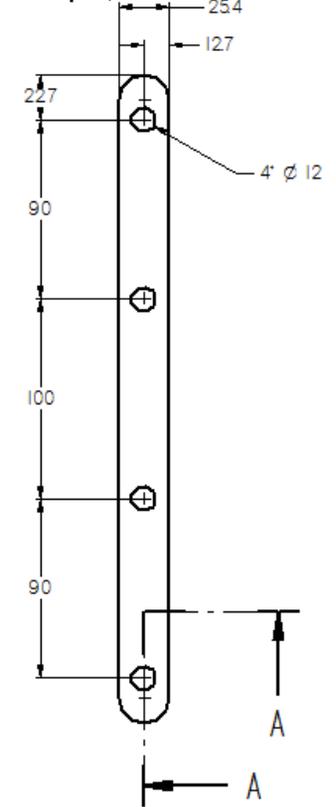
Nombre	Fecha	U.P.B	
Dibujado Nemoto	17/7/14	Universidad Pontificia Bolivariana	
Comprobado		Título	
Aprobado 1		Laminadora de Cizallamiento	
Aprobado 2		A3	Plano
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$		Ensamble	Rev
		1.44	Peso
			Hoja 1

SOLID EDGE ACADEMIC COPY



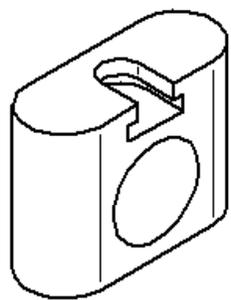
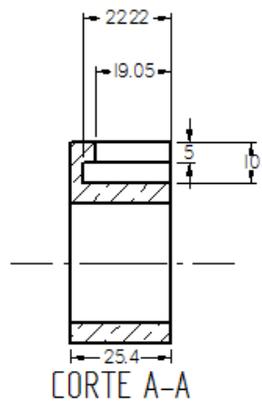
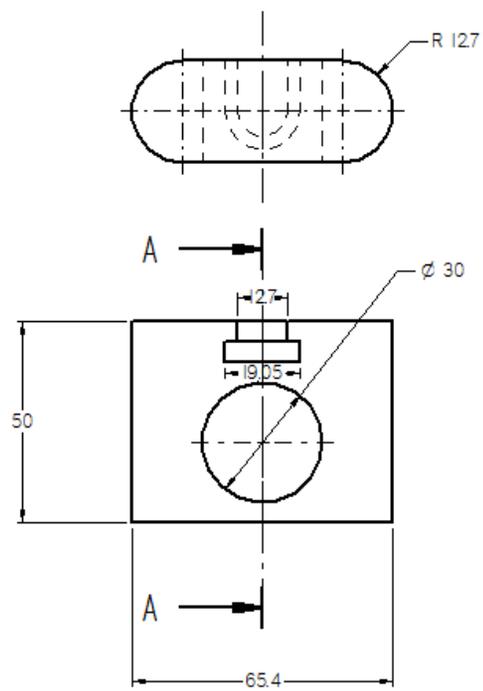


Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

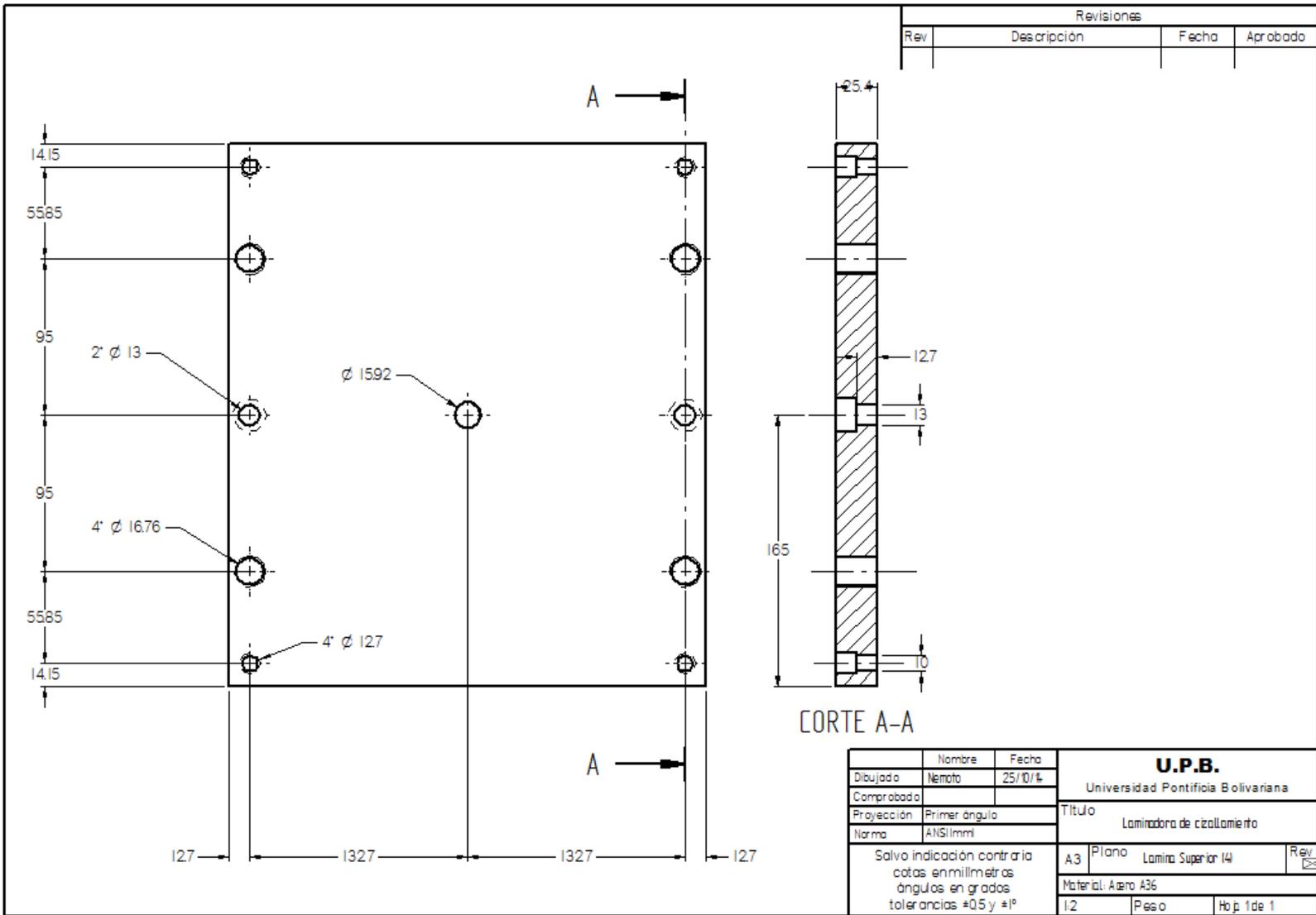


Nombre	Fecha	U.P.B. Universidad Pontificia Bolivariana		
Dibujado	Nemoto 27/11/14			
Comprobado		Título Laminadora de cizallamiento		
Proyección	Primer ángulo			
Norma	ANSI/mm	Material: Acero A36		
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ± 0.5 y $\pm 1^\circ$		A3	Peso	Rev. 1
		1.5	Hojas	1 de 1

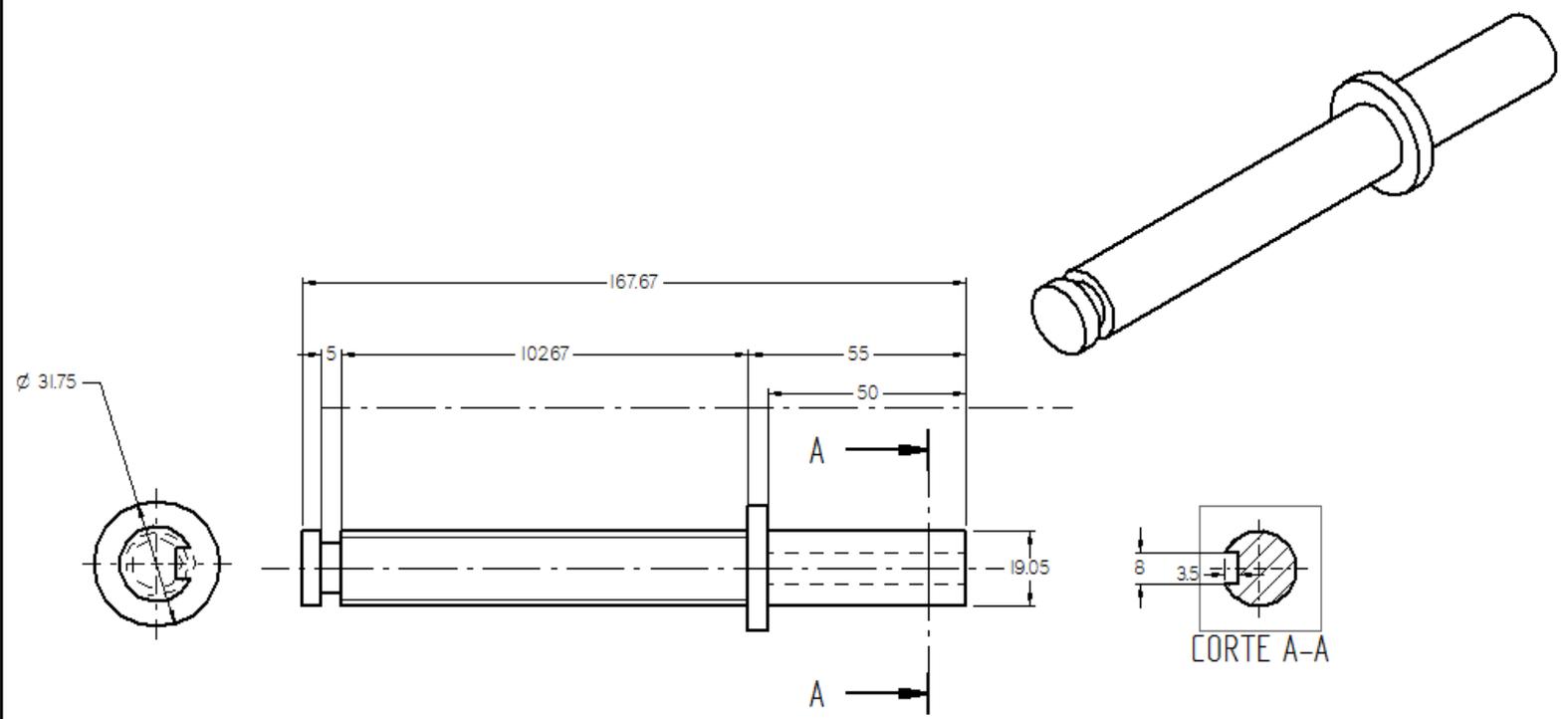
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



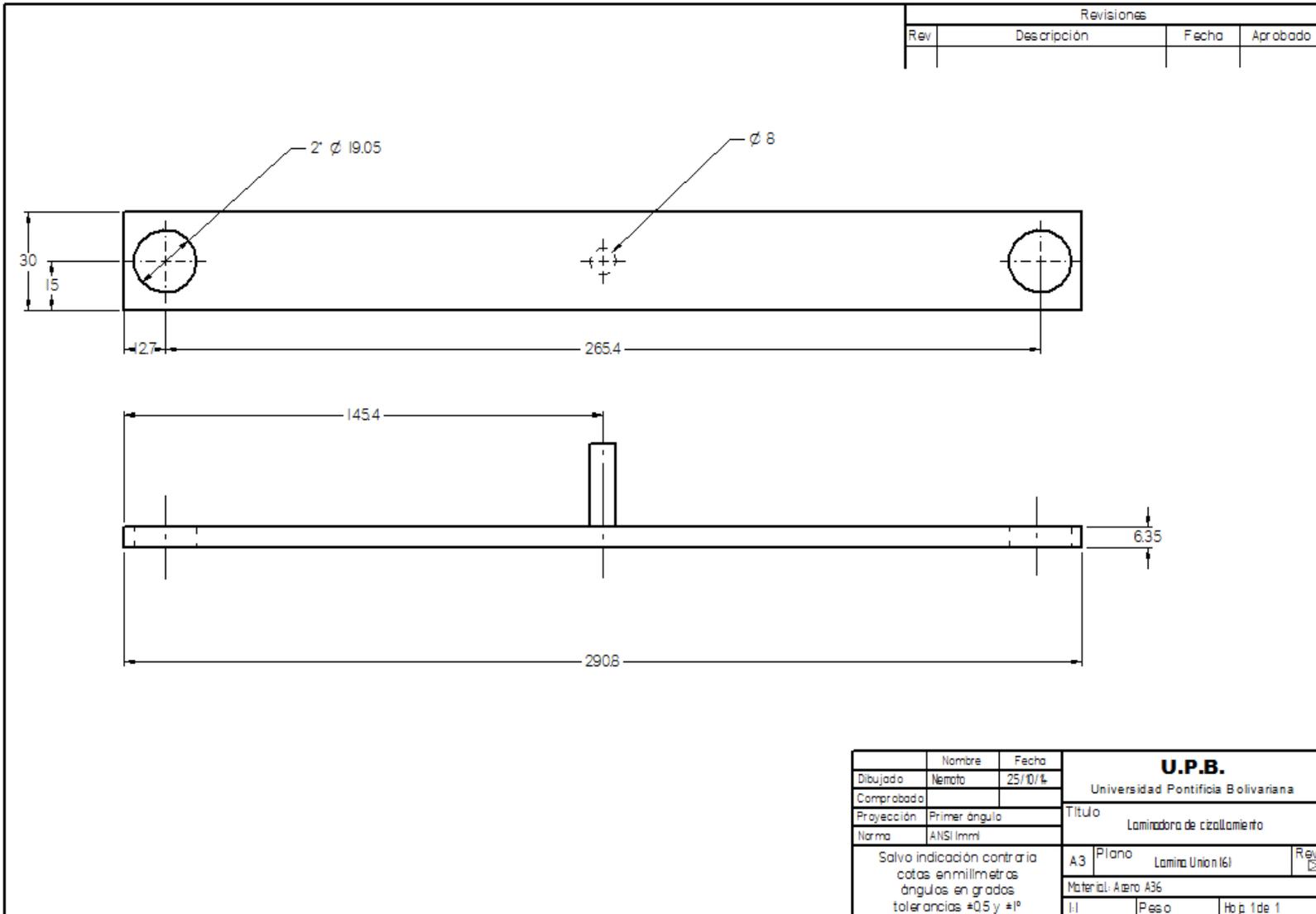
Nombre	Fecha	U.P.B. Universidad Pontificia Bolivariana	
Dibujado: Nemato	27/11/14		
Comprobado:		Título: Laminadora de cizallamiento	
Proyección: Primer ángulo		Material: Bronce	
Norma: ANSI/mm		A3	Plano
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ± 0.5 y $\pm 1^\circ$		Buje	Rev. 1/23
		Peso	Hojas de 1



Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

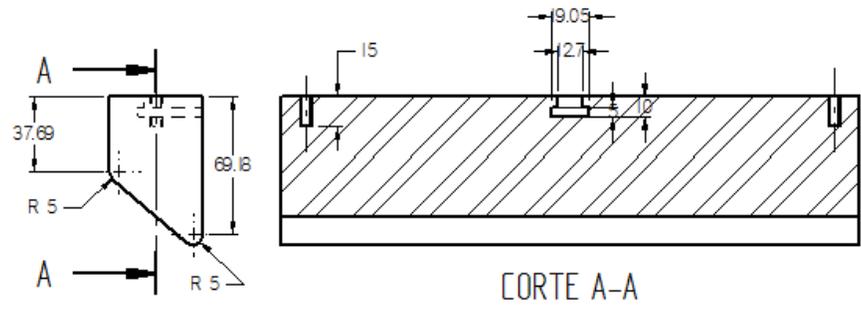


Nombre	Fecha	U.P.B.	
Dibujado Nemoto	25/10/14	Universidad Pontificia Bolivariana	
Comprobado		Título	
Proyección Primer ángulo		Laminadora de cizallamiento	
Norma ANSI mm		Rev	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias +0.5 y +1º		A3 Plano Tornillo Elevador 5l	25
		Material: Acero 4140	
		Peso	Hoj. 1 de 1

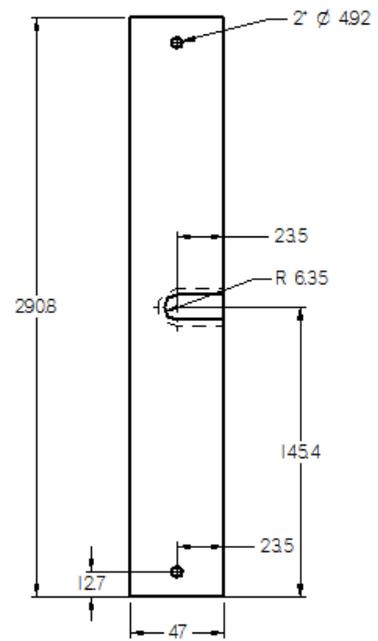


Nombre	Fecha	U.P.B. Universidad Pontificia Bolivariana			
Dibujado	Nemoto			25/01/14	
Comprobado		Título Laminadora de cizallamiento			
Proyección	Primer ángulo				
Norma	ANSI/mm	A3	Piano	Lamina Union 161	Rev. 01
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ± 0.5 y $\pm 1^{\circ}$		Material: Acero A36			
		1:1	Peso	Hoja 1 de 1	

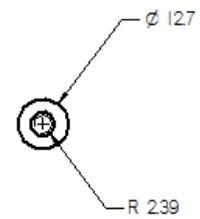
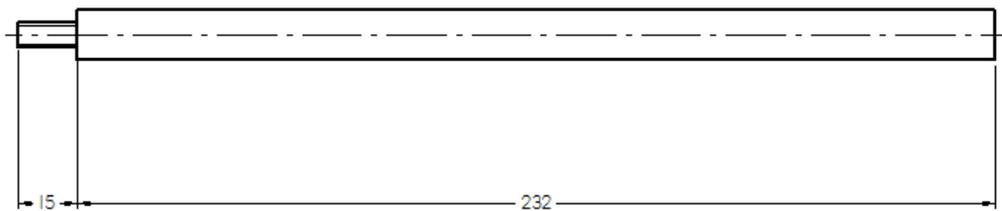
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



CORTE A-A



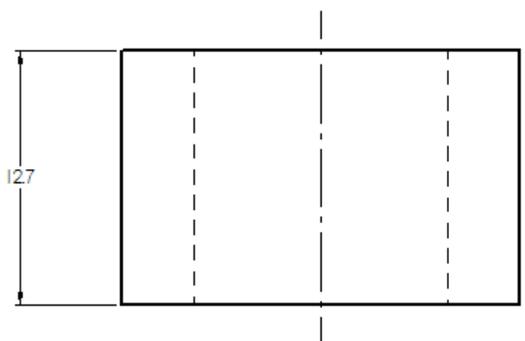
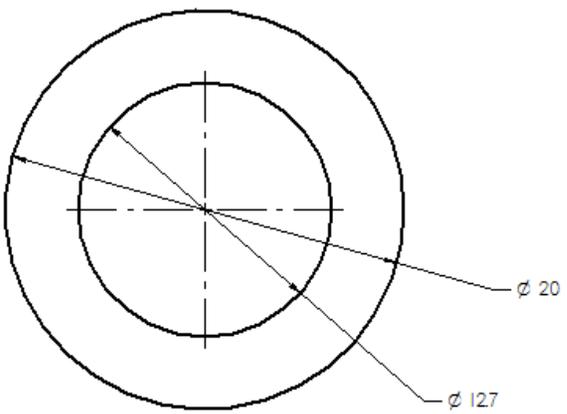
	Nombre	Fecha	U.P.B. Universidad Pontificia Bolivariana	
Dibujado	Nemoto	25/0/4		
Comprobado			Titulo Laminadora de cizallamiento	
Proyección	Primer ángulo			
Norma	ANSI/mm		A3 Plano Puzón (7) Rev <input type="checkbox"/>	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias +0.5 y -1º				
	Material: Acero A36			
	Peso		Hoja 1 de 1	



Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

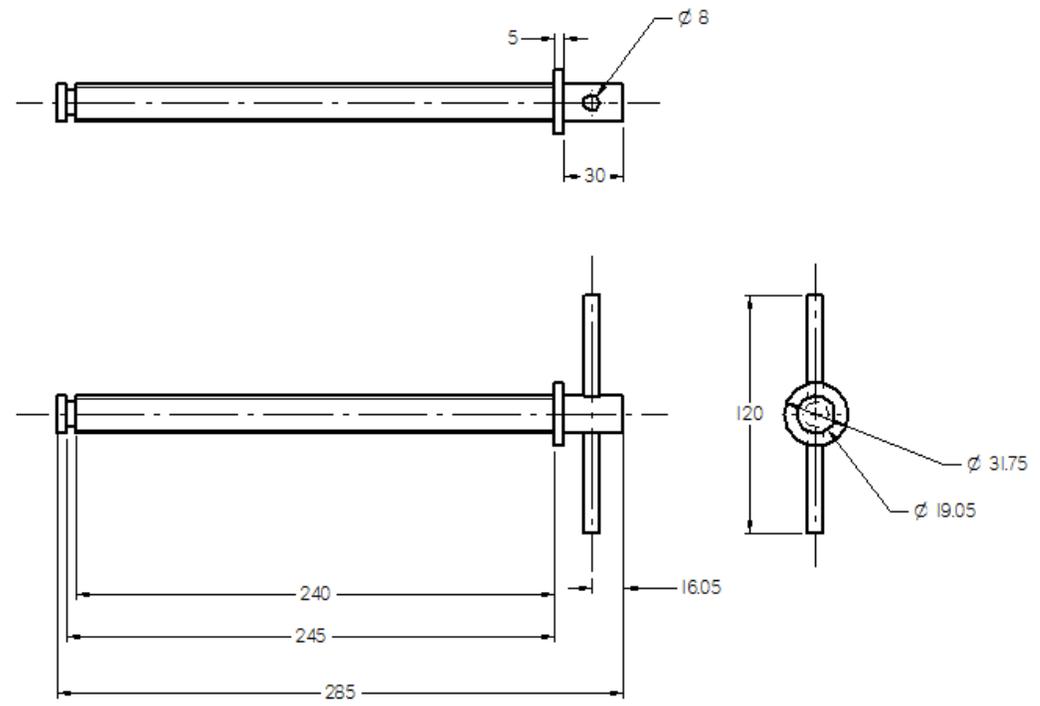
Nombre	Fecha	U.P.B. Universidad Pontificia Bolivariana			
Dibujado: Nemoto	25/10/14				
Comprobado		Título Laminadora de czallamiento			
Proyección: Primer ángulo					
Norma: ANSI mm		A3	Piano	Guía Eje (B)	Rev. CSA
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0.5 y ±1°		Material: Acero 4 40			
		1.2	Peso	Hoja 1 de 1	

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

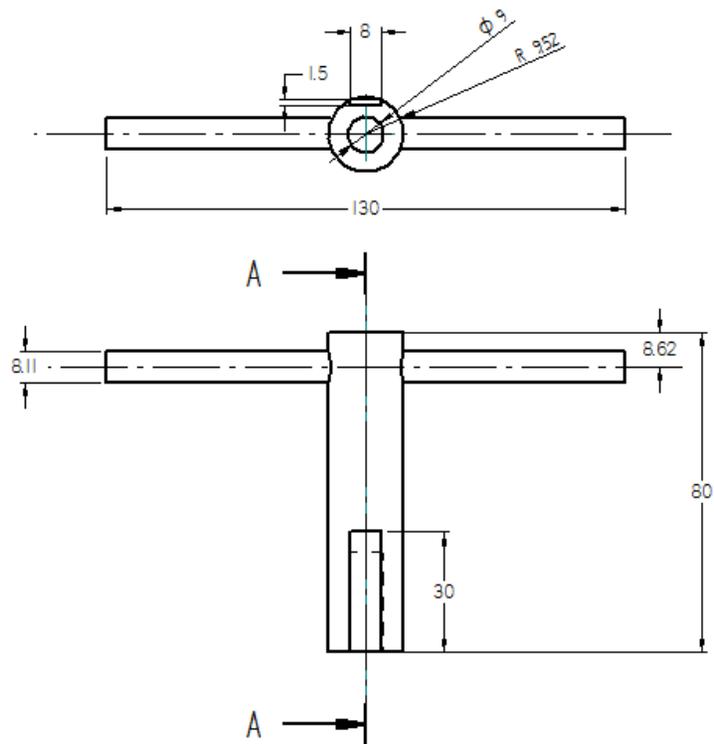


	Nombre	Fecha	U.P.B. Universidad Pontificia Bolivariana	
Dibujado	Nemoto	25/10/14		
Comprobado			Título Laminadora de ciclamiento	
Proyección	Primer ángulo			
Norma	ANSI mm		A3	Plano
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ± 0.5 y $\pm 1^\circ$			Buje Elevador 19	
			Material: Bronce	
SI	Peso	Hojas	1	de 1

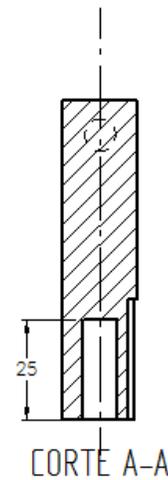
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



Nombre	Fecha	U.P.B. Universidad Pontificia Bolivariana			
Dibujado: Nemato	25/01/4				
Comprobado		Título Laminadora de cizallamiento			
Proyección: Primer ángulo					
Norma: ANSI/mm		A3	Plano	Tornillo Bevedor Purzón (10)	Rev. <input type="checkbox"/>
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ± 0.5 y $\pm 1^\circ$		Material: Acero 4140			
		12	Peso	Hoja 1 de 1	



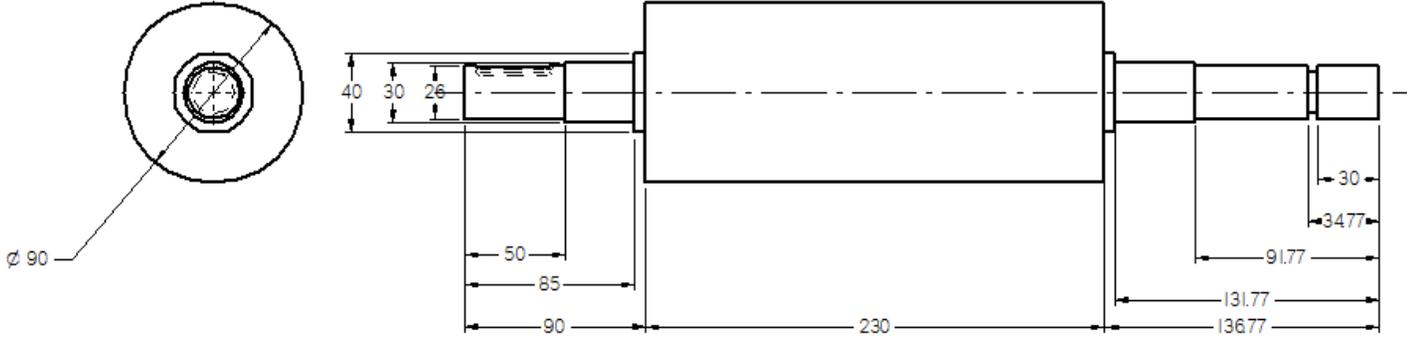
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



CORTE A-A

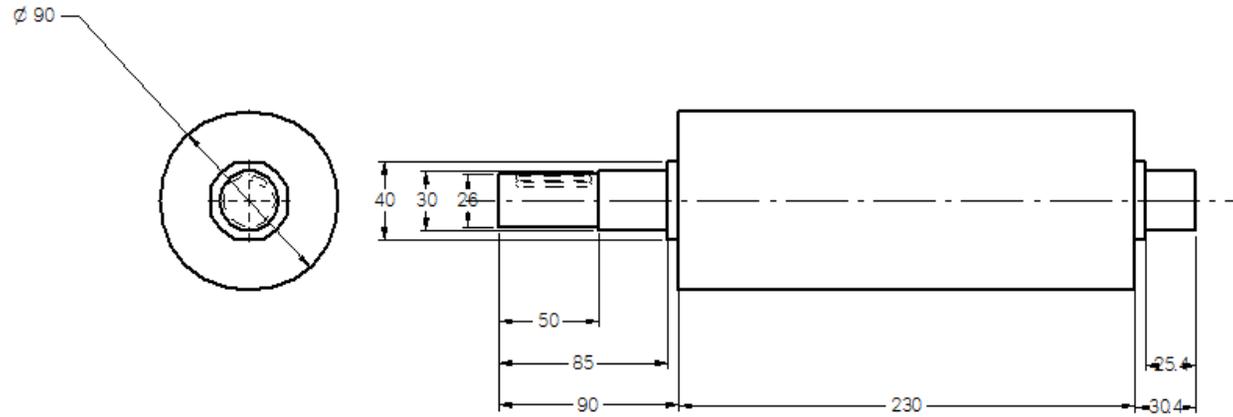
Nombre	Fecha	U.P.B. Universidad Pontificia Bolivariana			
Dibujado	Nemato			25/10/14	
Comprobado		Título Laminadora de cizallamiento			
Proyección	Primer ángulo				
Norma	ANSI/mm	A3	Plano	Palanca (11)	Rev. 1
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0.5 y ±1°		Material: Acero 4140			
		1:1	Peso	Hoja 1 de 1	

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



	Nombre	Fecha	U.P.B. Universidad Pontificia Bolivariana	
Dibujado	Nemoto	25/10/14		
Comprobado			Título Laminadora de cizallamiento	
Proyección	Primer ángulo			
Norma	ANSI mm		A3	Piano
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0.5 y ±1°			Radillo Inferior (1/4)	
				Rev CSA
Material: Acero 1045 Reacido			12	Peso
			Hoja 1 de 1	

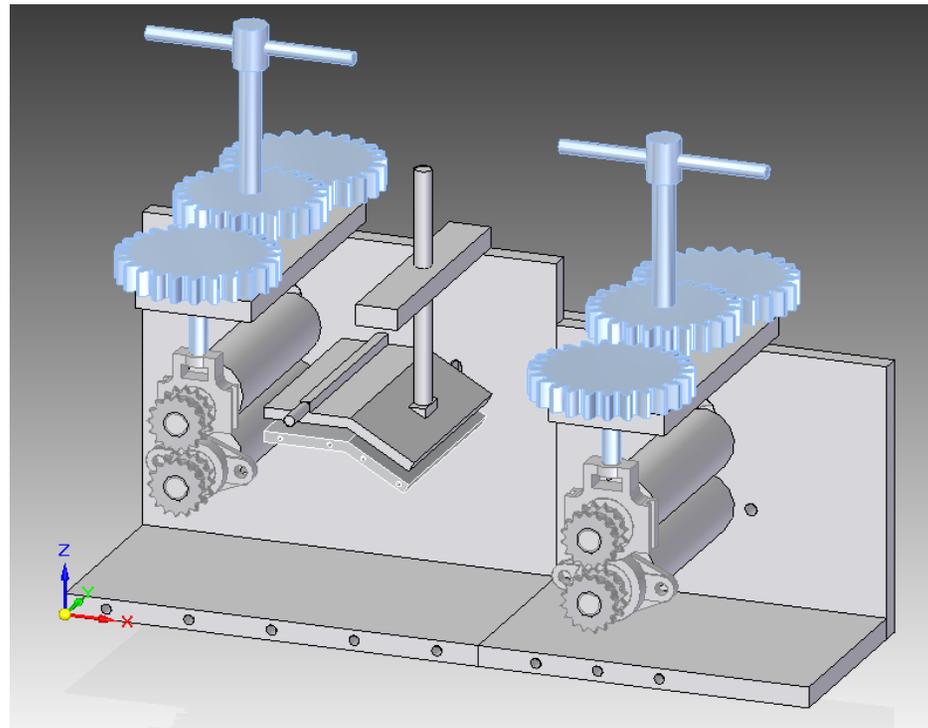
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



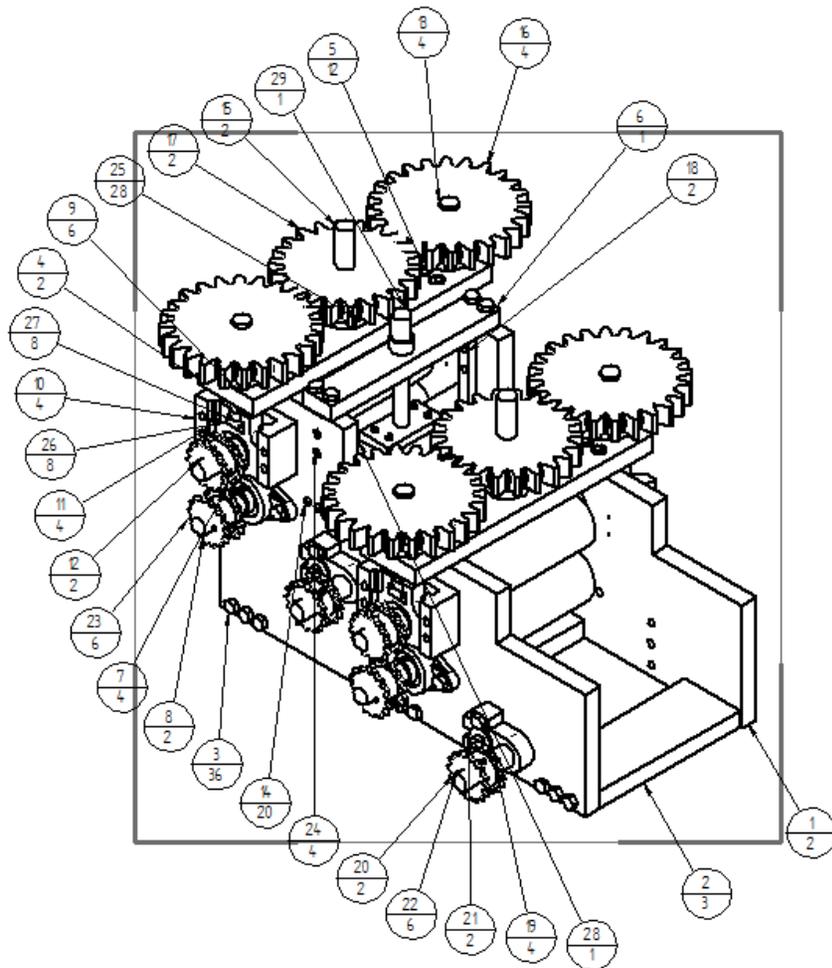
	Nombre	Fecha	U.P.B. Universidad Pontificia Bolivariana	
Dibujado	Nemoto	25/07/11		
Comprobado			Título Laminadora de cizallamiento	
Proyección	Primer ángulo			
Norma	ANSI/mm		A3	Piano
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ± 0.5 y $\pm 1^\circ$			Rodillo Superior (5)	
			Material: Acero 1045 Forjado	
			1.2	Peso
				Hoja 1 de 1

Anexo 9. Laminadora de cizallamiento según el criterio del fabricante

Cuando se reúne con el fabricante para la fabricación de la laminadora de cizallamiento, se nos recomienda modificar los planos para facilitar su fabricación. Se sigue las sugerencias y también se modifica algunos parámetros para que la maquina tenga la capacidad de generar cizallamiento en elementos diferentes a las láminas de magnesio. Con las modificaciones y elementos comerciales que se pueden obtener en el mercado, se obtiene un nuevo diseño de la laminadora de cizallamiento. En la siguiente figura se puede observar el bosquejo de la maquina según los criterios del fabricante.



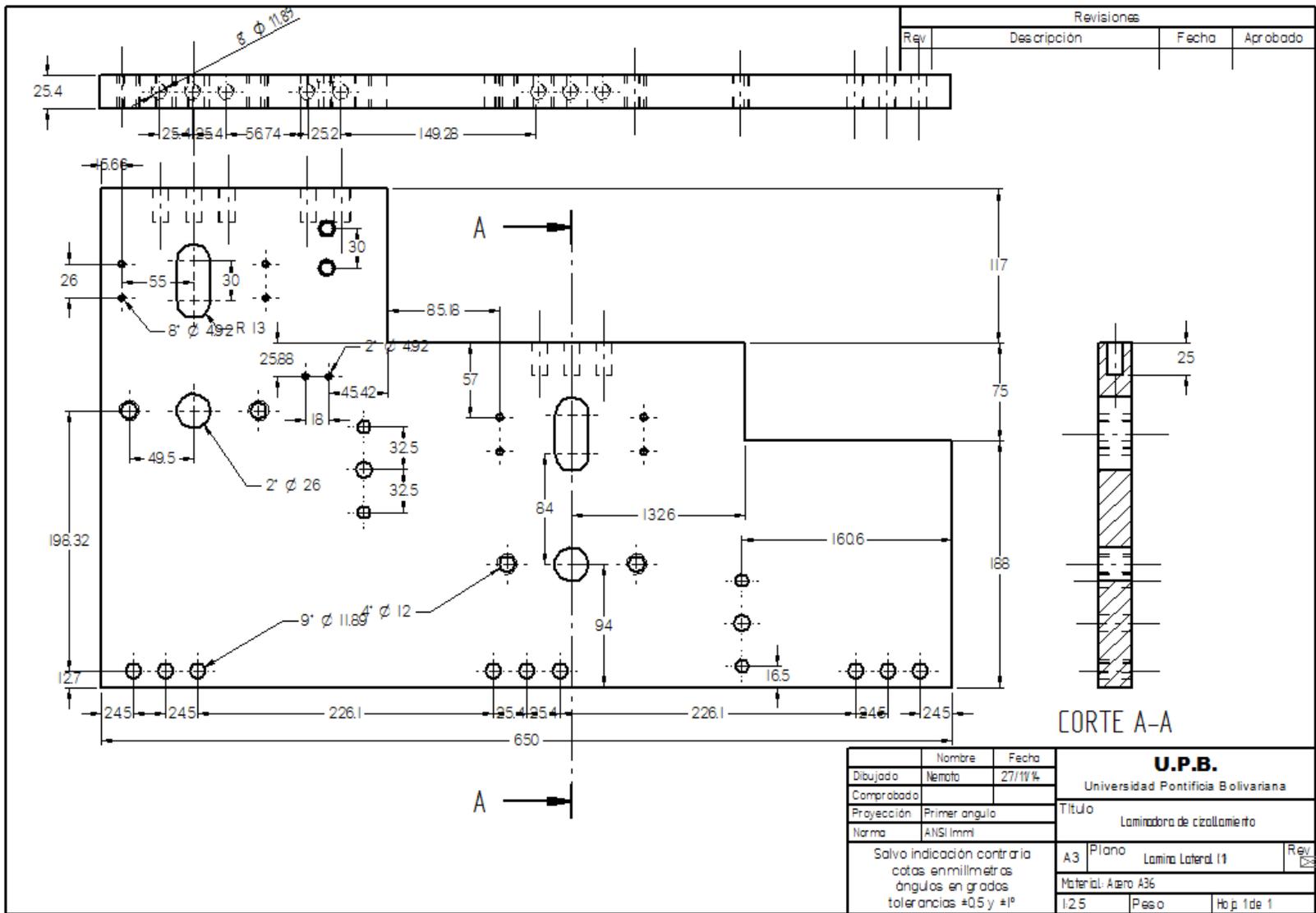
A continuación se pueden observar los planos de cada una de las piezas que componen la laminadora de cizallamiento. (Nota: Igual que los planos anteriores, estas no están a escala real)



Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

Número de Elemento	Pieza	Cantidad
1	Lamina Lateral	2
2	Lamina Inferior	3
3	Tomillo DIN 933E M-12	36
4	Placa Superior	2
5	Tomillo DIN 965 M-8	12
6	Lamina Superior Sujetador	1
7	UCFL205 D1_25	4
8	Rodillo Inferior	2
9	Soporte Guia	6
10	WB (+UCT205)	4
11	UCT205 D1_25	4
12	Rodillo Superior	2
13	Tomillo Elevador	4
14	DIN 7971 N. 14	20
15	Tomillo Elevador Central	2
16	Engranaje Dp=48, Z=24	4
17	Engranaje dp=44, Z=22	2
18	Guia Dado	2
19	Guia Tensor	4
20	Tensor	2
21	DIN 125 M12	2
22	Cuna	6
23	SP40S D16 N_25	6
24	DIN 84 M 10	4
25	DIN 84 M 6	28
26	Dao Tornillo Elevador	8
27	DIN 84 M 4	8
28	Dado Superior	1
29	Tomillo Elevador Dado Sup.	1
30*	Dado Inferior	1

Nombre	Fecha	U.P.B.	
Dibujado Nemoto	28/0/4	Universidad Pontificia Bolivariana	
Comprobado		Titulo Laminadora de cizallamiento	
Aprobado 1		A3 Plano Ensamble completo	
Aprobado 2		Rev	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias +0.5 y -0.1		15	Peso Hb p. 1 de 1

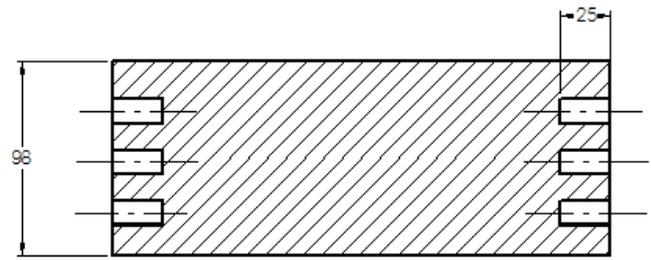


Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

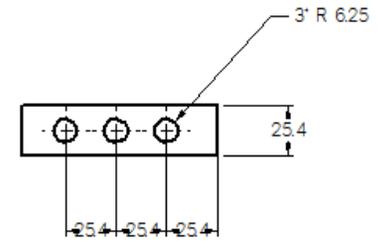
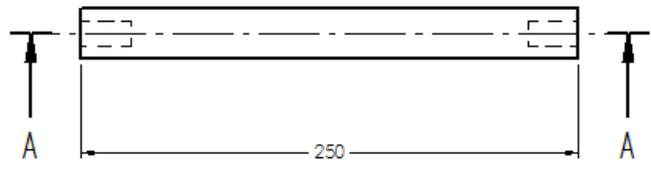
CORTE A-A

Nombre	Fecha	U.P.B.	
Dibujado Nemoto	27/11/4	Universidad Pontificia Bolivariana	
Comprobado		Titulo	
Proyección Primer angulo		Laminadora de cizallamiento	
Norma ANSI/mm		A3	Plano Lamina lateral 11
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0.5 y ±1°		Material: Acero A36	Rev. 1/23
12.5	Peso	Hoja 1 de 1	

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

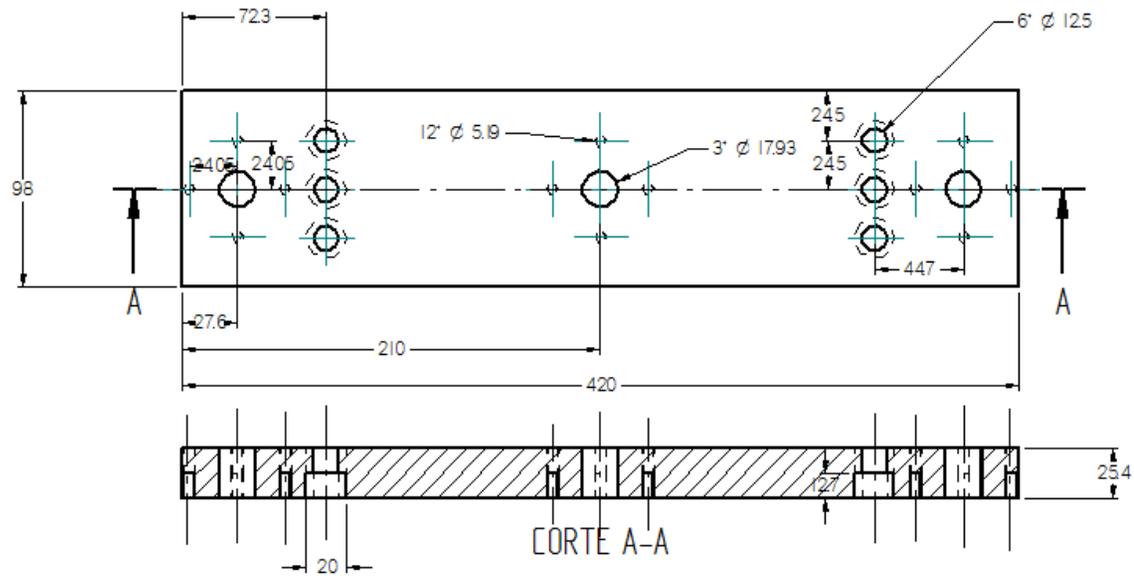


CORTE A-A

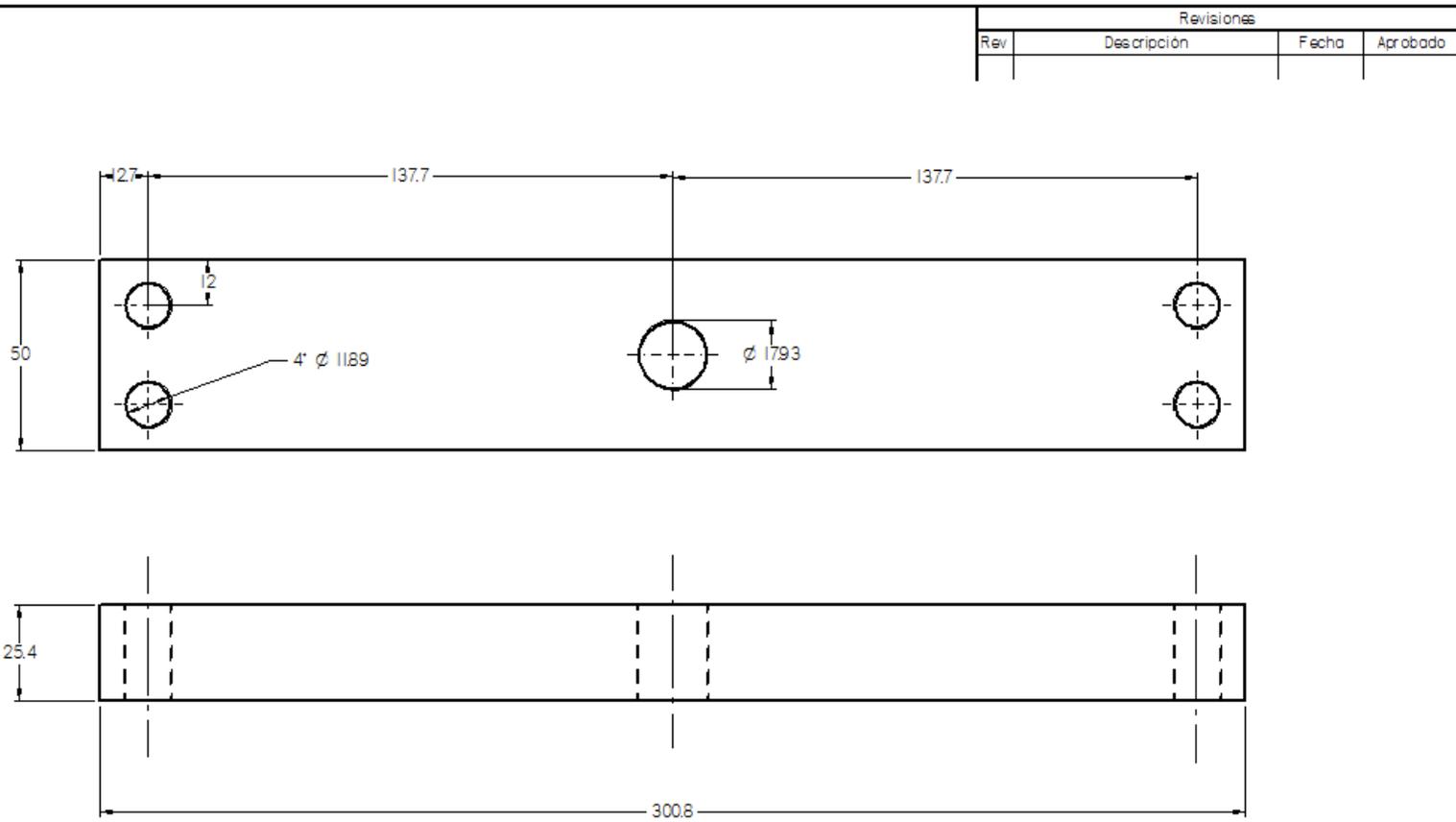


	Nombre	Fecha	U.P.B. Universidad Pontificia Bolivariana		
Dibujado	Nemoto	27/11/14			
Comprobado			Título Laminadora de cizallamiento		
Proyección	Primer ángulo				
Norma	ANSI/mm		A3	Piano Lamina Inferior (2)	Rev. 23
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0.5 y ±1°			Material: Acero A36		
			12	Peso	Ho p. 1 de 1

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



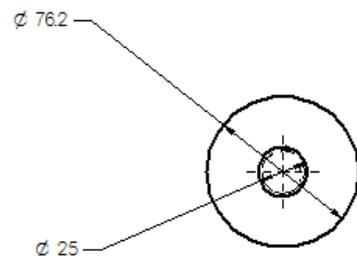
Nombre	Fecha	U.P.B.	
Dibujado	Nemoto	Universidad Pontificia Bolivariana	
Comprobado		Título	
Proyección	Primer ángulo	Laminadora de cizallamiento	
Norma	ANSI/mm	Rev	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias +0.5 y ±0		A3	Plano Placa Superior (4)
		Material: Acero A36	
		12	Peso Hoja 1 de 1



Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

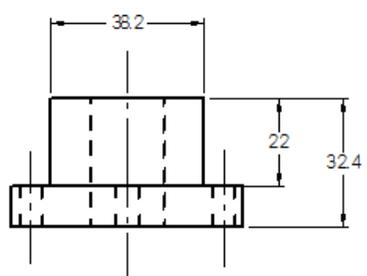
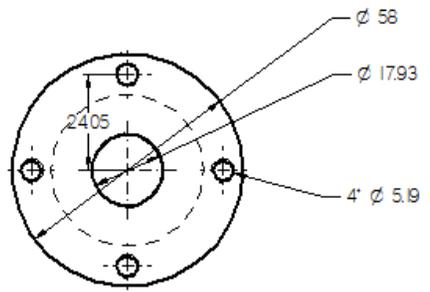
Nombre	Fecha	U.P.B. Universidad Pontificia Bolivariana		
Dibujado: Nemoto	27/11/14			
Comprobado		Título Laminadora de cizallamiento		
Proyección: Primer ángulo				
Norma: ANSI mm		A3	Piano Lamina Superior Sujetador I6	Rev 1/2
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0.5 y ±1°		Material: Acero A36		
		1/1	Peso	Hoj. 1 de 1

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



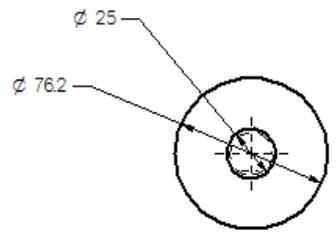
Nombre	Fecha	U.P.B.	
Dibujado: Nemoto	27/11/14	Universidad Pontificia Bolivariana	
Comprobado		Título	
Proyección: Primer ángulo		Laminadora de cizallamiento	
Norma: ANSI/mm		A3	Plano Rodillo inferior (8)
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ± 0.5 y $\pm 1^\circ$		Material: Acero 1045 Reacido	
		1/2	Peso Hoja 1 de 1

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



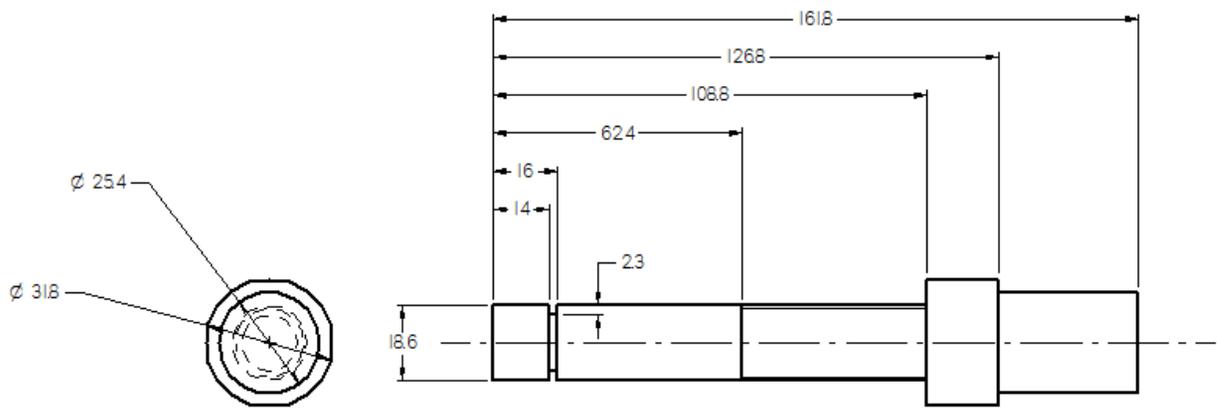
	Nombre	Fecha	U.P.B. Universidad Pontificia Bolivariana	
Dibujado	Nemoto	27/11/14		
Comprobado			Título Laminadora de cizallamiento	
Proyección	Primer ángulo			
Norma	ANSI/mm		A3 Plano Soporte guía B) Rev. 23	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias +0.5 y +1º				
			Material: Acero 4%0	
				Peso
			Hoja 1 de 1	

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



Nombre	Fecha	U.P.B. Universidad Pontificia Bolivariana	
Dibujado	Nemoto		
Comprobado		Título Laminadora de cizallamiento	
Proyección	Primer ángulo		
Norma	ANSI/mm	A3 Plano Rodillo Superior (2)	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias +0.5 y +1º			
Material: Acero 1045 Remecido		Rev	
12	Peso	Hoja 1 de 1	

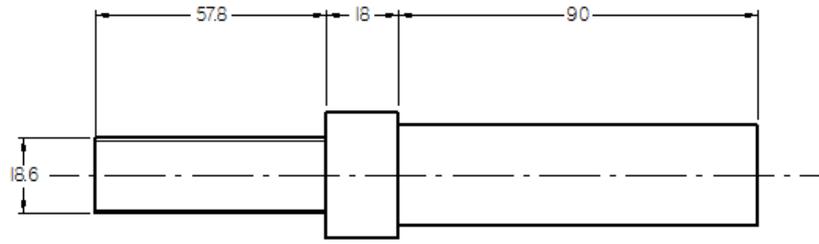
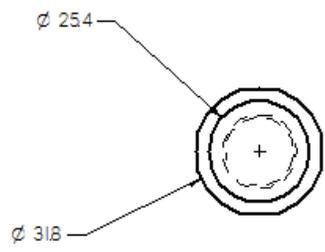
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



Nombre	Fecha	U.P.B. Universidad Pontificia Bolivariana	
Dibujado	Nemoto 27/11/14		
Comprobado		Título	
Proyección	Primer ángulo	Laminadora de ciclotamiento	
Norma	ANSI/mm	A3	Piano Tornillo Elevador (8)
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ± 0.5 y $\pm 1^{\circ}$		Material: Acero 4140	
			Peso

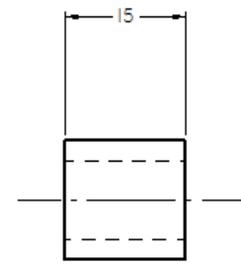
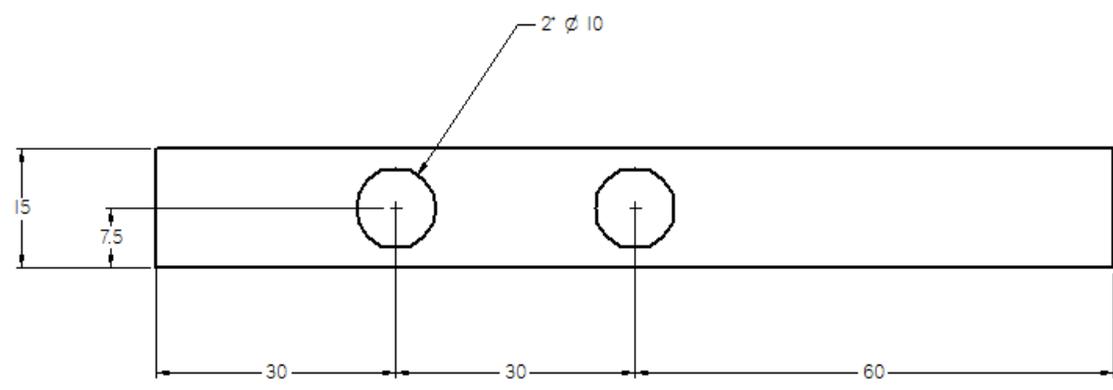
Rev. 1

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



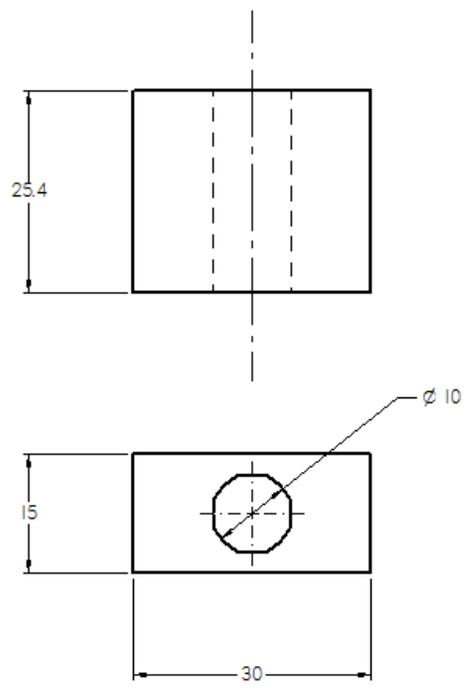
Nombre	Fecha	U.P.B. Universidad Pontificia Bolivariana	
Dibujado: Nemoto	27/11/14		
Comprobado:		Título: Laminadora de cizallamiento	
Proyección: Primer ángulo		A3	Plano
Norma: ANSI mm		Material: Acero 4140	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ± 0.5 y $\pm 1^\circ$		11	Peso
		Hoja 1 de 1	

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

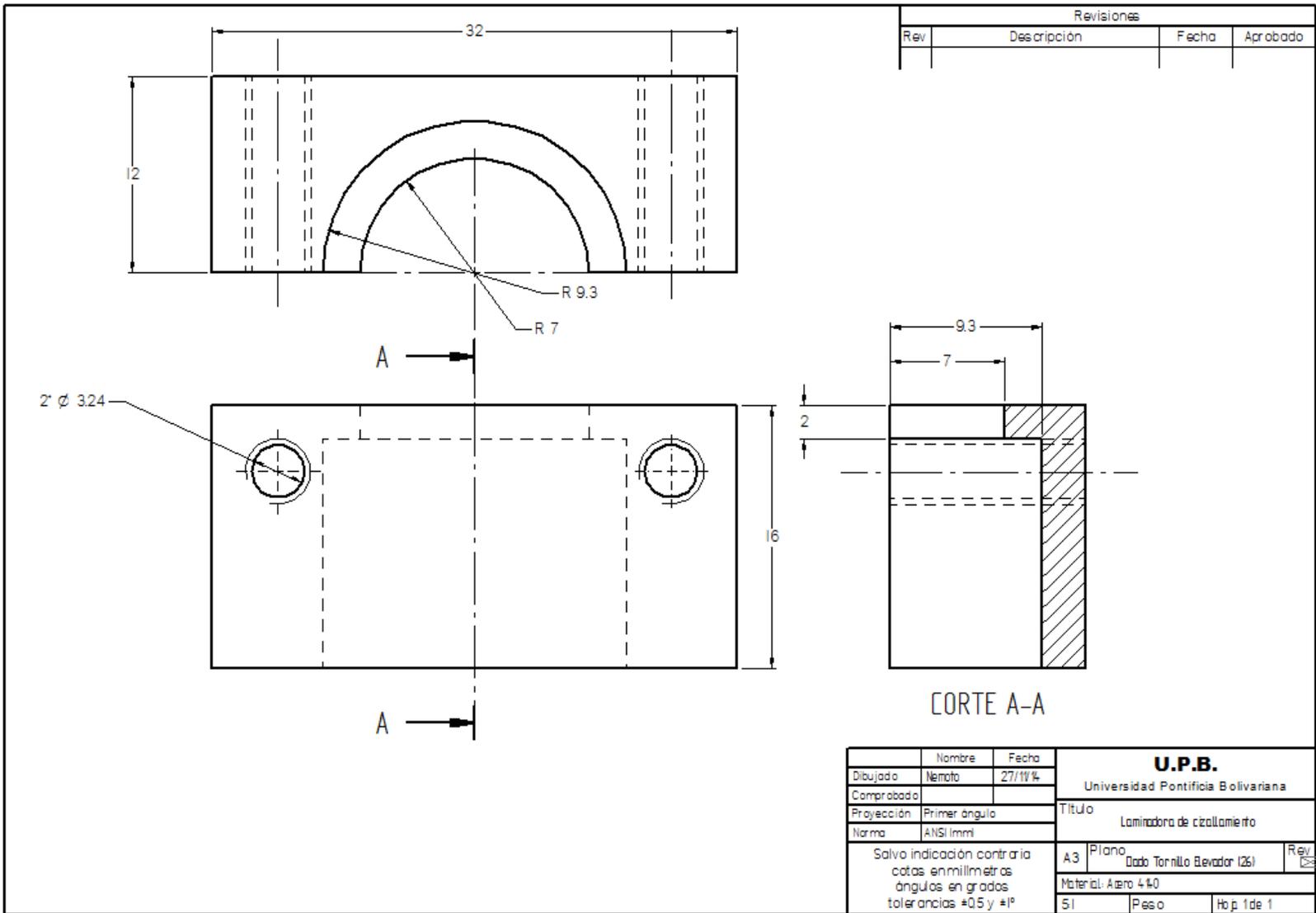


Nombre	Fecha	U.P.B. Universidad Pontificia Bolivariana			
Dibujado	Nemoto 27/11/14				
Comprobado		Título Laminadora de cizallamiento			
Proyección	Primer ángulo				
Norma	ANSI/mm	A3	Plano	Escala dado (1:1)	Rev. 1
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0.5 y ±1°		Material: Acero 440		Hoja 1 de 1	

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



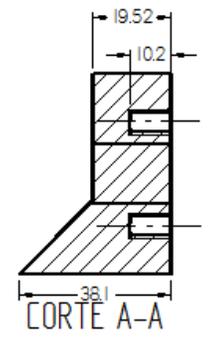
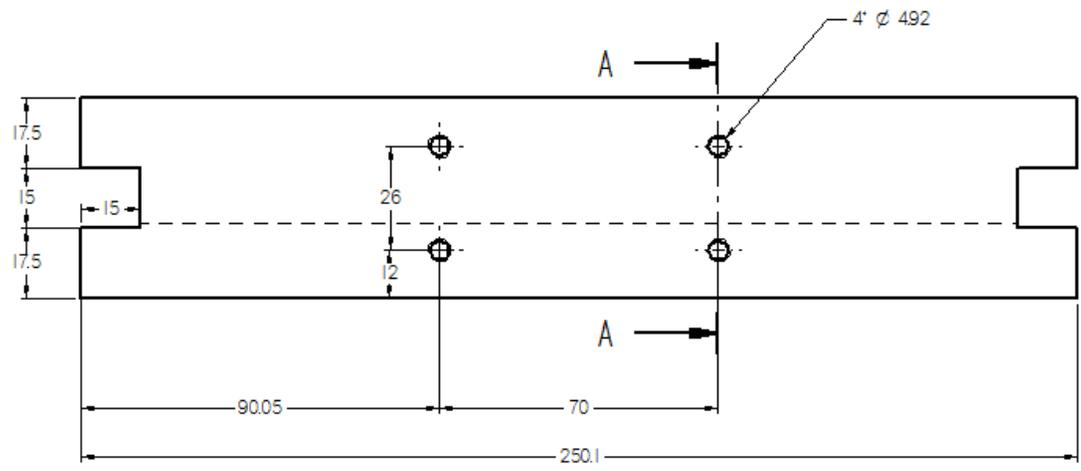
Nombre	Fecha	U.P.B. Universidad Pontificia Bolivariana	
Dibujado	Nemato		
Comprobado		Título Laminadora de cizallamiento	
Proyección	Primer ángulo		
Norma	ANSI/mm	A3 Plano	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0.5 y ±1°		Guia tensor (9)	
		Material: Acero 440	
		21	Peso
		Hoja 1 de 1	



Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

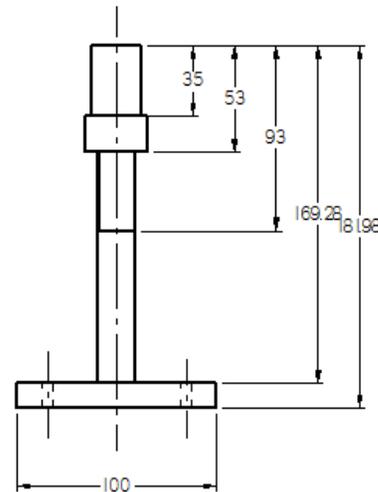
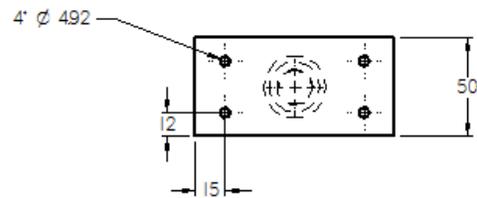
Nombre	Fecha	U.P.B.	
Dibujado: Nemato	27/11/14	Universidad Pontificia Bolivariana	
Comprobado		Título	
Proyección: Primer ángulo		Laminadora de cizallamiento	
Norma: ANSI 1mm		A3	Plano
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias #0.5 y #1°		Dado Tornillo Blevador (26)	
		Material: Acero 440	
		SI	Peso
		Hoja 1 de 1	

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



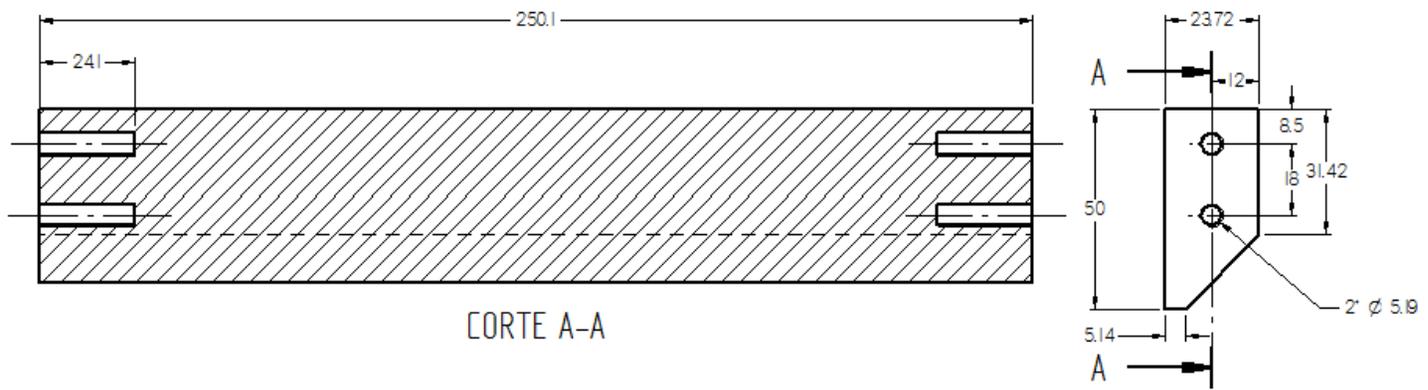
	Nombre	Fecha	U.P.B. Universidad Pontificia Bolivariana			
Dibujado	Nemato	27/11/14				
Comprobado			Título Laminadora de cizallamiento			
Proyección	Primer ángulo					
Norma	ANSI/mm		Material: Acero A36			
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0.5 y ±1°			A3	Plano	Dado Superior (28)	Rev.
			11	Peso	Hoja 1 de 1	

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



Nombre	Fecha	U.P.B.	
Dibujado: Nemato	28/10/14	Universidad Pontificia Bolivariana	
Comprobado		Título	
Proyección: Primer ángulo		Laminadora de cizallamiento	
Norma: ANSI mm		Rev	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0.5 y ±1°		A3 Plano	Tar. No. Bevedor dado sup (29)
		Material: Acero 440	
		1.2	Peso Hb. p. 1 de 1

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



CORTE A-A

Nombre	Fecha	U.P.B.	
Dibujado: Nemoto	28/10/14	Universidad Pontificia Bolivariana	
Comprobado		Título	
Proyección: Primer ángulo		Laminadora de cizallamiento	
Norma: ANSI/mm		A3	Plano
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0.5 y ±1°		Dado inferior (B0)	
		Material: Acero A36	
		1.1	Peso
			Hoj. 1 de 1

